



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Trabajo Fin de Grado

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio y análisis de la certificación y diseño de
un SBAS (Satellite Based Augmentation System)
para aeropuertos/heliódromos

Autora: María del Carmen Furquet Gascón

Fecha: Julio 2016

Tutor: Israel Quintanilla García

Cotutor: Pedro Yuste Pérez

Resumen

El presente documento trata de la certificación y validación de un procedimiento GNSS (Global Navigation Satellite System) basado en GPS y en sistemas de aumentación, más concretamente en el SBAS (Satellite Based Augmentation System) europeo EGNOS. De entre todos los servicios que ofrece la red de satélites EGNOS, se procede al análisis del conocido como LPV-200, que se empleará en un futuro próximo en casi todos los aeropuertos y helipuertos europeos para el guiado en operaciones de aproximación a pista. El análisis se realiza, más concretamente, a partir de los datos recogidos en la estación de Albacete, donde se pretende construir un helipuerto próximamente.

Tras una introducción teórica de los diferentes sistemas GNSS actuales y sus correspondientes SBAS, se analizan los requerimientos establecidos por la OACI y se observa si se cumplen dichos requerimientos. Posteriormente, se ha llevado a cabo una simulación durante 5 días haciendo uso del software PEGASUS, cuyos resultados reforzarán la primera etapa de certificación.

Se ha conseguido validar dicho sistema, viendo que se cumple lo establecido, lo que permite entregar dichos resultados a un segundo Trabajo de Fin de Grado que continuará el procedimiento de validación con medidas reales, así como con el diseño de procedimientos. Dicho TFG corre a cargo de Lucía Senchermés Cháfer.

Agradecimientos

Antes de comenzar con la descripción del proyecto, quisiera agradecer a todas aquellas personas que han hecho posible la consecución del título de Grado en Ingeniería Aeroespacial, así como la realización del Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor, el Dr. Israel Quintanilla, por brindarme la oportunidad de realizar el trabajo expuesto a continuación con él, así como por su gran dedicación como tutor y profesor, transmitiendo su pasión y conocimientos en sistemas de navegación globales. También a mi cotutor Pedro Yuste por poner a mi alcance sus conocimientos en gestión del espacio aéreo y sistemas de navegación.

También agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) y a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por la oportunidad de cursar este título de grado y su impartición amparada por la excelencia académica del mismo pese a tratarse de un grado relativamente nuevo.

Agradecer a mis padres y a mi abuelo su gran apoyo a lo largo de estos cuatro años de grado y su preocupación continua, a mi hermano por su admiración hacia mi trabajo y a mi abuela por su entusiasmo, pese a que pudo demostrarlo tan sólo durante dos de los cuatro años que ocupa la carrera. Agradecer también a Aurora, Claudia, Paula, Valeria, Eduardo, José, Javier, Carlos y Rosendo, especialmente, su valioso apoyo e infinita paciencia como compañeros y amigos.

Finalmente, agradecer a todos mis compañeros de la universidad que han compartido conmigo estos cuatro años de estudio, repletos de experiencias y que han pasado muy rápido.

Índice General

Resumen.....	1
Agradecimientos	2
I. MEMORIA.....	7
Glosario	8
Lista de Figuras.....	12
1. Introducción	16
2. Objetivos	19
3. Sistemas GNSS.....	20
3.1. Descripción.....	20
3.2. GPS	21
3.3. GLONASS	22
3.4. Galileo	23
3.5. Beidou	24
3.6. IRNSS o NAVIC	25
3.7. QZSS.....	25
3.8. Sistemas de aumentación	25
4. SBAS.....	27
4.1. Fundamentos matemáticos	28
4.2. WAAS.....	29
4.3. MSAS	29
4.4. GAGAN.....	30
4.5. EGNOS	30
4.5.1. Segmento espacial.....	30
4.5.2. Segmento tierra.....	31
4.5.3. Segmento usuario	32
4.5.4. Mensaje EGNOS	33
5. PBN.....	35
5.1. Concepto PBN.....	35
5.2. Operaciones PBN.....	37
5.3. PBN y GNSS.....	39
6. SESAR.....	41
6.1. Fase de Definición	41
6.2. Fase de Desarrollo.....	41

6.3.	Fase de Despliegue.....	42
6.4.	NextGen.....	42
7.	LPV-200	43
7.1.	Descripción.....	43
7.2.	Beneficios en su utilización	44
7.3.	Funcionamiento	46
7.4.	Implementación	47
7.5.	Implementación en España.....	53
8.	Requerimientos.....	55
8.1.	Precisión	56
8.2.	Integridad	57
8.3.	Continuidad	59
8.4.	Disponibilidad.....	61
9.	Validación de procedimientos PBN.....	63
9.1.	Campaña de toma de datos a largo plazo.....	63
9.1.1.	Precisión	63
9.1.2.	Integridad	64
9.1.3.	Continuidad	64
9.1.4.	Disponibilidad.....	65
9.2.	Campaña sobre el terreno.....	66
9.3.	Ensayo de vuelo.....	66
10.	Formato, obtención y manipulación de datos	67
10.1.	Formato RTCM	67
10.2.	NTRIP	67
10.3.	RTCA	68
10.4.	Formato NMEA.....	68
10.5.	Formato RINEX	68
10.5.1.	Ficheros de observación.....	70
10.5.2.	Ficheros de mensaje de navegación	73
10.6.	Obtención de datos	76
10.6.1.	Servidor FTP.....	77
10.7.	Ficheros SBAS	79
10.8.	Hatanaka	82
10.9.	TEQC	83

11.	Software	85
11.1.	SBAS Teacher.....	85
11.2.	SBAS MENTOR	86
11.3.	SISNET UAS	87
11.4.	SISNET lab.....	87
11.5.	PEGASUS.....	88
11.5.1.	Convertor	90
11.5.2.	GNSS Solution.....	91
11.5.3.	MFileRunner	92
11.5.4.	Trabajo con PEGASUS.....	94
12.	Resultados obtenidos.....	96
12.1.	Precisión	96
12.2.	Integridad	99
12.3.	Continuidad	115
12.4.	Disponibilidad.....	118
13.	Conclusiones.....	120
II.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	122
14.	Condiciones generales	123
14.1.	General.....	123
14.2.	Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	124
15.	Condiciones de especificaciones técnicas.....	131
15.1.	Especificaciones de materiales y equipos	131
III.	PRESUPUESTO	134
16.	Presupuesto	135
16.1.	Introducción	135
16.2.	Estado de mediciones	136
16.3.	Desglose de costes unitarios	137
16.3.1.	Coste de material y software unitario.....	137
16.3.2.	Coste de personal cualificado unitario.....	139
16.3.3.	Coste de oficina unitario	139
16.4.	Desglose de costes totales	140
16.4.1.	Coste de material y software total.....	140
16.4.2.	Coste de personal cualificado total.....	140
16.4.3.	Coste de oficina total	140

16.5.	Resumen del presupuesto total	141
17.	Bibliografía	142

I. MEMORIA

Glosario

ETSID	Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
UPV	Universidad Politécnica de Valencia
TFG	Trabajo de Fin de Grado
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
GPS	Global Positioning System
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
ABAS	Aircraft Based Augmentation System
SBAS	Satellite Based Augmentation System
GBAS	Ground Based Augmentation System
EGNOS	European Geostationary Ground System
APV-1	Non-precision Approach with Vertical Guidance
LPV	Localizer Performance with Vertical Guidance
LPV-200	Localizer Performance with Vertical Guidance equivalent to ILS CAT I
ILS	Instrument Landing System
EE UU	Estados Unidos
UE	Unión Europea
RNP	Required Navigation Performance
PBN	Performance Based Navigation
SESAR	Single European Sky ATM Research
WGS84	World Geodetic System 1984
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	European Reference Organization
IAG	International Association of Geodesy
SA	Selective Availability
C/A	Coarse Acquisition
SPS	Standard Positioning System
PPS	Precise Positioning System
OS	Open System
CS	Commercial Service
PRS	Public Regulated Service
SAR	Search And Rescue Service
SoL	Safety of Life
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
GEO	Geostationary Earth Orbit

IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
AS	Authorized Service
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
NAVIC	NAVigation Indian Constellation
GSO	Geosynchronous Satellite Orbit
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
HEO	Highly Elliptical Orbit
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
FDE	Fault Detection and Exclusion
WAAS	Wide Area Augmentation System
FAA	Federal Aviation Agency
LNAV/VNAV	Lateral Navigation/Vertical Navigation
LP	Localizer Performance
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
GAGAN	GPS Aided Augmented Navigation
ESA	European Space Agency
PRN	Pseudo Random Noise
AOR-E	Atlantic Ocean Region East
EMEA	Europe Middle East Africa
SES	Sirius-5
RIMS	Ranging Monitoring Stations
MCC	Mission Control Centers
CPF	Central Processing Facility
CCF	Central Control Facility
NLES	Navigation Land Earth Stations
PACF	Performance Assessment and Check-out Facility
ASQF	Application Specific Qualification Facility
EDAS	EGNOS Data Access Service
CE	Comisión Europea
SJU	Empresa Común SESAR
IDP	Interim Development Programme
CDM	Collaborative Decision Making
MT	Message Type
HNSE	Horizontal Navigation System Error
VNSE	Vertical Navigation System Error
GSA	European GNSS Space Agency

VAL	Vertical Alert Limit
HAL	Horizontal Alert Limit
DH	Decision Height
IAP	Instrumental Approach Procedure
GPS SV	GPS Space Vehicle
RNAV	aRea NAVigation
SID	Standard Instrument Departure Chart
STAR	Standard Terminal Arrival Route
APP	Approach
PANS OPS	Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations
ASECNA	Agency for Aerial Navigation Safety in Africa and Madagascar
AL	Alert Limit
TAL	Time to Alert
IR	Integrity Risk
PL	Protection Level
MI	Missed Information
HMI	Hazardous Missed information
HSI	Horizontal Safety Index
VSI	Vertical Safety Index
HPL	Horizontal Protection Level
VPL	Vertical Protection Level
HPE	Horizontal Position Error
VPE	Vertical Position Error
LT	Long Term
ST	Short Term
EOL	End-Of-Life
ESSP	European Satellite Services Provider
SIS	Signal In Space
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Service
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
NMEA	National Marine Electronics Association
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
UTC	Coordinated Universal Time
IGS	International GNSS Service
IGN	Instituto Geográfico Nacional
ERGNSS	Red de Estaciones GNSS Permanentes

EPN	European Permanent Network
FTP	File Transfer Protocol
PAG	Programa de Aplicaciones Geodésicas
SBAS TEACHER	SBAS Tool For Education And Contributor to Harness EGNOS Research
SBAS MENTOR	SBAS MESSage GENerATOR
EMS	EGNOS Message System
IGP	Ionospheric Grid Points
UAS	User Application Software
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
GTL	MagicGEMINI Graphic Tool
AENA	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
a	Amortización en euros
VC	Valor de Compra
VR	Valor Residual en el período de amortización
n	Período de amortización
t_h	Tasa horaria
h	Horas trabajadas

Lista de Figuras

Figura 1.1: Aeropuertos con NextGen en EE UU. En azul los operativos y en verde los planificados.....	17
Figura 1.2: Implementación de procedimientos GNSS en Europa.....	18
Figura 3.1: Arquitectura del sistema GNSS.....	21
Figura 3.2: Señales EGNOS y Galileo	24
Figura 4.1: Arquitectura del sistema SBAS.....	27
Figura 4.2: Arquitectura del segmento terrestre EGNOS.....	31
Figura 4.3: Arquitectura de EGNOS.....	33
Figura 4.4: Tipos de mensaje EGNOS y descripción.....	34
Figura 5.1: Especificación RNAV.....	36
Figura 5.2: RNP y RNAV en las fases de vuelo.....	36
Figura 5.3: Especificaciones PBN.....	38
Figura 5.4: Especificaciones PBN APP.....	38
Figura 5.5: Especificaciones 3D.....	39
Figura 5.6: GNSS en fase de aproximación.....	40
Figura 7.1: Satélites GEO operativos usados por EGNOS.....	47
Figura 7.2: Aeropuertos operativos con LPV/LP en EE UU.....	48
Figura 7.3: Cobertura LPV en EE UU.....	48
Figura 7.4: Aeronaves y receptores equipadas con LPV WAAS.....	49
Figura 7.5: LPV-200 en Europa.....	50
Figura 7.6: LPV-200 Implantación.....	50
Figura 7.7: Operadores que trabajan con LPV-200 (2014).....	51
Figura 7.8: Aerolíneas regionales europeas listas para usar EGNOS.....	51
Figura 7.9: Estado presente y futuro de la implantación LPV-200.....	52
Figura 8.1: Requisitos LPV-200.....	55
Figura 8.2: Precisión LPV-200 (2015).....	56
Figura 8.3: Diagrama de Stanford.....	58
Figura 8.4: Continuidad LPV-200 Workshop 2015.....	60
Figura 8.5: Disponibilidad LPV-200 Workshop 2015.....	62
Figura 9.1: Errores de precisión LPV-200.....	64

Figura 9.2: Índice de seguridad vertical y horizontal.....	64
Figura 9.3: Continuidad para el sistema LPV-200.....	65
Figura 9.4: Disponibilidad SIS para los satélites activos.....	65
Figura 9.5: Disponibilidad LPV-200.....	65
Figura 10.1: Ficheros de observación RINEX.....	72
Figura 10.2: Fichero de observación RINEX ALBA122A.16d.....	73
Figura 10.3: Ejemplo de fichero de navegación RINEX.....	74
Figura 10.4: Fichero de Navegación RINEX.....	75
Figura 10.5: Estación de Albacete.....	77
Figura 10.6: Directorio FTP para el 1 de junio de 2016.....	78
Figura 10.7: Interfaz del PAG.....	79
Figura 10.8: Captura del FTP de EDAS.....	81
Figura 10.9: Captura de pantalla de la descompresión de ficheros RINEX usando Hatanaka en la ventana de comandos.....	82
Figura 10.10: Programa TEQC concatenando los archivos.....	83
Figura 11.1: Interfaz del programa SBAS TEACHER.....	85
Figura 11.2: Interfaz del programa SBAS MENTOR.....	86
Figura 11.3: Interfaz del programa SISNET UAS.....	87
Figura 11.4: Interfaz del programa SISNET LAB.....	88
Figura 11.5: Interfaz del programa PEGASUS.....	89
Figura 11.6: Interfaz del módulo Convertor de PEGASUS.....	90
Figura 11.7: Interfaz del módulo GNSS Solution de PEGASUS.....	91
Figura 11.8: Interfaz del módulo MFileRunner de PEGASUS.....	93
Figura 12.1: Resultados de precisión para el 1 de mayo.....	96
Figura 12.2: Resultados de precisión para el 2 de mayo.....	97
Figura 12.3: Resultados de precisión para el 3 de mayo.....	97
Figura 12.4: Resultados de precisión para el 4 de mayo.....	98
Figura 12.5: Resultados de precisión para el 5 de mayo.....	98

Figura 12.6: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 1 de mayo.....	99
Figura 12.7: Resultados HSI para el 1 de mayo.....	100
Figura 12.8: Resultados HPE para el 1 de mayo.....	100
Figura 12.9: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 1 de mayo.....	101
Figura 12.10: Resultados VSI para el 1 de mayo.....	101
Figura 12.11: Resultados VPE para el 1 de mayo.....	102
Figura 12.12: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 2 de mayo.....	102
Figura 12.13: Resultados HSI para el 2 de mayo.....	103
Figura 12.14: Resultados HPE para el 2 de mayo.....	103
Figura 12.15: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 2 de mayo.....	104
Figura 12.16: Resultados VSI para el 2 de mayo.....	104
Figura 12.17: Resultados VPE para el 2 de mayo.....	105
Figura 12.18: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 3 de mayo.....	105
Figura 12.19: Resultados HSI para el 3 de mayo.....	106
Figura 12.20: Resultados HPE para el 3 de mayo.....	106
Figura 12.21: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 3 de mayo.....	107
Figura 12.22: Resultados VSI para el 3 de mayo.....	107
Figura 12.23: Resultados VPE para el 3 de mayo.....	108
Figura 12.24: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 4 de mayo.....	108
Figura 12.25: Resultados HSI para el 4 de mayo.....	109
Figura 12.26: Resultados HPE para el 4 de mayo.....	109
Figura 12.27: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 4 de mayo.....	110
Figura 12.28: Resultados VSI para el 4 de mayo.....	110
Figura 12.29: Resultados VPE para el 4 de mayo.....	111
Figura 12.30: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 5 de mayo.....	111
Figura 12.31: Resultados HSI para el 5 de mayo.....	112
Figura 12.32: Resultados HPE para el 5 de mayo.....	112

Figura 12.33: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 5 de mayo..... 113

Figura 12.34: Resultados VSI para el 5 de mayo..... 113

Figura 12.35: Resultados VPE para el 5 de mayo..... 114

Figura 12.36: Resultados de continuidad para el 1 de mayo..... 115

Figura 12.37: Resultados de continuidad para el 2 de mayo..... 115

Figura 12.38: Resultados de continuidad para el 3 de mayo..... 116

Figura 12.39: Resultados de continuidad para el 4 de mayo..... 116

Figura 12.40: Resultados de continuidad para el 5 de mayo..... 117

Figura 12.41: Disponibilidad para el 1 de mayo..... 118

Figura 12.42: Disponibilidad para el 2 de mayo..... 118

Figura 12.43: Disponibilidad para el 3 de mayo..... 119

Figura 12.44: Disponibilidad para el 4 de mayo..... 119

Figura 12.45: Disponibilidad para el 5 de mayo..... 119

1. Introducción

A lo largo de los últimos años, el uso de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) ha aumentado notablemente en prácticamente todos los ámbitos de la vida diaria, permitiendo un posicionamiento bastante preciso empleando receptores relativamente baratos. Estos sistemas, presentan un campo de aplicación muy amplio y su extensión es cada vez mayor, encontrándose en diferentes segmentos del mercado, como son, por ejemplo, el marítimo, de vigilancia, de carretera, ferroviario, agricultura, medida de tiempo y sincronización y, principalmente y el que es el objetivo de este proyecto, el sector de la aviación.

Por su parte, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) tomó conciencia de la importancia de estos sistemas en la navegación aérea en un futuro cercano, ya que comienzan a complementar los sistemas convencionales basados en radioayudas, así como la aparente futura sustitución de los mismos por dichos sistemas GNSS. Su uso en cualquier condición meteorológica, así como un mantenimiento más rentable de la infraestructura, supone una gran ventaja frente a los sistemas actuales.

No obstante, los sistemas de navegación a fecha de hoy, GPS y GLONASS, estando el proyecto Galileo en fase de desarrollo, no son suficientes por sí solos para ser utilizados como sistema de navegación por no cumplir con los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad impuestos por la ya citada OACI en el sector de la aviación, principalmente. Existen para solucionar dicho problema una serie de sistemas de aumentación: ABAS (Aircraft Based Augmentation System), SBAS (Satellite Based Augmentation System) y GBAS (Ground Based Augmentation System).

El objetivo de este trabajo es el estudio del sistema europeo de SBAS, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) para conocer el proceso de certificación en operaciones de aproximación LPV-200 (Localizer Performance with Vertical Guidance para aproximaciones de precisión, equivalente a ILS CAT I) realizando simulaciones con el software apropiado.

Es un proyecto que presenta una estrecha relación con las tendencias de evolución actuales de la navegación aérea. Tanto en Europa como en EEUU y en otras partes del mundo, la tendencia es implementar dichos procedimientos de navegación por satélite en tantos aeropuertos como sea posible y con la intención de conseguir todas las mejoras que conlleva

su implantación: optimización del espacio aéreo, reducción del impacto medioambiental y ruido, ahorro de combustible, mayor seguridad y precisión en las operaciones y menor coste de infraestructura y mantenimiento de la misma.

En Estados Unidos se encuentra el mayor número de aeropuertos con este tipo de procedimientos, habiendo conseguido cobertura total en las operaciones del sistema LPV-200.



Figura 1.1: Aeropuertos con NextGen en EE UU. En azul los operativos y en verde los planificados

En lo que a Europa se refiere, el proceso de implantación se encuentra a nivel menor, siendo Francia, Alemania y Reino Unido los países en los que están situados prácticamente todos los aeropuertos en los que dichos procedimientos ya están operativos, aunque los planes de implantación abarcan la casi totalidad de los países europeos.

En España, los dos primeros aeropuertos donde se decidió comenzar a implantar los nuevos procedimientos se encuentran en Santander y Málaga. El éxito de los mismos ha conducido a planificar la implantación de dichos procedimientos en numerosos aeropuertos y helipuertos españoles, entre los que se encuentran los aeropuertos de Valencia y Alicante y el helipuerto de Albacete.

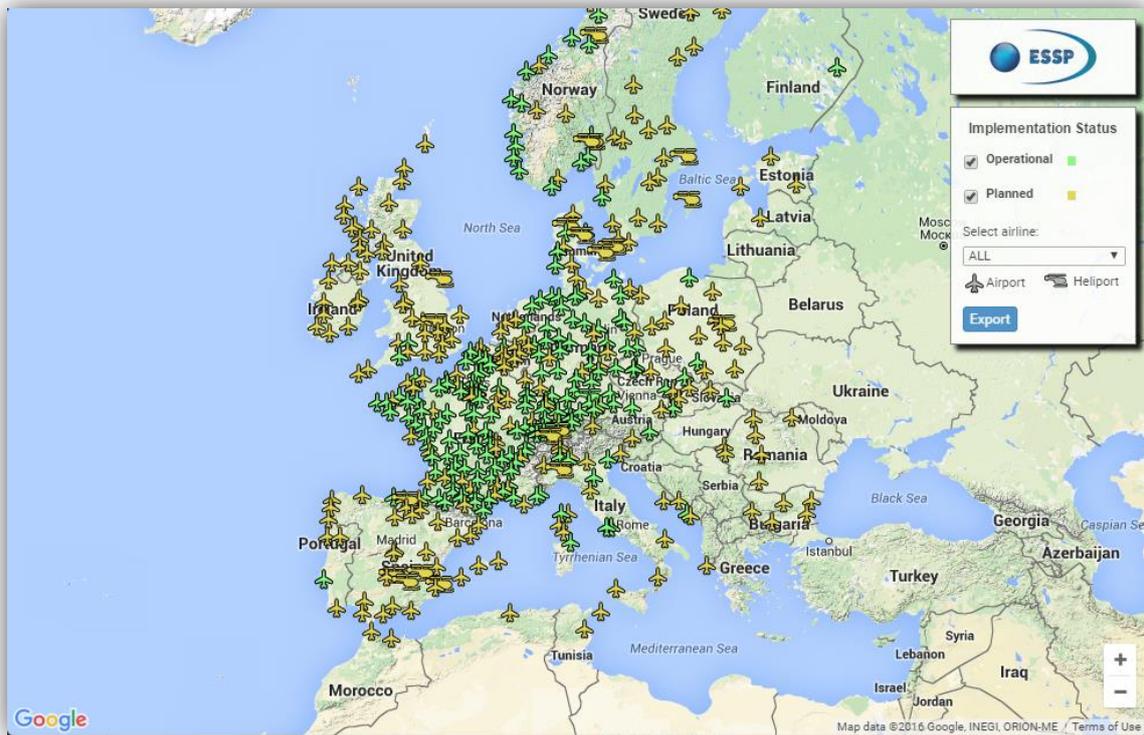


Figura 1.2: Implementación de procedimientos GNSS en Europa

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el de la simulación y análisis de un procedimiento LPV-200 para la certificación del sistema EGNOS en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño. Para ello, es necesario estudiar los mensajes de EGNOS, sistema SBAS europeo, para realizar un análisis de su contenido y comprobar si se cumplen los requisitos para la operaciones RNP Approach de tipo LPV-200 (Localizer Performance with Vertical Guidance equivalente a ILS CAT I).

Para la consecución de dicho objetivo, se realizará, en primer lugar, una explicación teórica de los sistemas GNSS actuales, así como de los sistemas de aumentación existentes y requerimientos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad necesarios para cumplir con las directrices establecidas por los organismos internacionales de navegación aérea. También se explicará su relación con PBN y con SESAR.

Para la certificación de este tipo de procedimientos se requieren tres fases de ensayos, de las cuales se desarrollarán dos. Para ello, se han empleado distintos tipos de software, realizándose la simulación final con PEGASUS, software desarrollado por EUROCONTROL para analizar los datos de los sistemas de navegación globales por satélite. Las fases consecutivas, la campaña sobre el terreno con medidas reales y no simuladas, así como el diseño de procedimientos, se realizarán en un TFG complementario al presentado a continuación y que corre a cargo de Lucía Senchermés Cháfer. Es decir, el objetivo de este trabajo es proporcionar una base y los primeros pasos a seguir para la construcción de un helipuerto en Albacete.

3. Sistemas GNSS

3.1.Descripción

Un sistema GNSS, o sistema global de navegación por satélite, es aquel que permite calcular la posición de un usuario con un receptor haciendo uso de una red de satélites de radiofrecuencia.

El campo de aplicaciones de los sistemas GNSS ha ido aumentando con el tiempo de manera considerable, sobre todo desde que en el año 2000 EEUU eliminara la disponibilidad selectiva de su sistema de satélites (GPS), posibilitando que todos los usuarios pudieran obtener una posición bastante precisa. Este hecho ha permitido la proliferación en sectores como los de agricultura, cartografía, coordinación horaria o aviación.

Estos sistemas GNSS, utilizan sistemas de referencia inerciales para el posicionamiento, siendo el más extendido el WGS84 (World Geodetic System 1984). No obstante, en España el sistema oficial es el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), promovido por la subcomisión EUREF de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y perfectamente compatible con el WGS84.

Los segmentos que componen un sistema global de navegación por satélite son tres: el espacial, el terrestre y el segmento usuario:

- **Segmento espacial:** Está constituido por los satélites que forman la constelación. Son necesarios, al menos, satélites visibles por el receptor para que un usuario pueda obtener su posición en cualquier momento y, así, obtener las 3 incógnitas de posicionamiento (x , y , z) y el tiempo. De esta forma, la geometría de la distribución de los satélites en el espacio es en varios planos orbitales con varios satélites en cada plano, siendo necesarios un total de normalmente 21 a 30 satélites.
- **Segmento terrestre:** O segmento de control, es el que se encarga de comprobar que todos los satélites funcionen correctamente monitorizando y actualizando o corrigiendo su información y parámetros. Está formado por estaciones que calculan continuamente su posición y la envían a centros de control, donde los datos son corregidos y enviados a los satélites para actualizar su información.

- **Segmento usuario:** Está constituido por cualquier receptor capaz de captar señal GNSS. Están formados por una antena receptora GNSS y un receptor con un reloj estable que calcula los pseudorangs y resuelve las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas.



Figura 3.1: Arquitectura de sistemas GNSS

Tras la explicación de la arquitectura de los sistemas GNSS, se procede a explicar los sistemas de navegación global por satélite presentes en la actualidad.

3.2.GPS

El sistema GPS fue el primero de los sistemas GNSS y sigue siendo el más importante de ellos. Su desarrollo comenzó a principios de los años 70 a manos del ejército norteamericano, siendo declarado como plenamente operativo en el año 1995. Sin embargo, y como ya se ha comentado anteriormente, no fue hasta el año 2000 cuando se eliminó la disponibilidad selectiva (del inglés SA: Selective Availability), lo que permitió la increíble expansión en el campo de aplicaciones de estos sistemas al mejorar la precisión considerablemente.

La señal GPS ha constado tradicionalmente de dos códigos: el C/A (Coarse Acquisition) de uso civil y gratuito y el código P(Y) de uso estrictamente militar.

La señal se distribuye en dos bandas de frecuencia: La L1 a 1575.42 MHz y la L2 a 1227.6 MHz. El código C/A se transmitía solamente por la banda L1 y tenía una precisión considerablemente inferior a la del código P, transmitida tanto en L1 como L2 para aplicaciones militares.

Sin embargo, actualmente el sistema GPS está en pleno proceso de transformación con el objetivo de mejorar sus prestaciones tanto civiles como militares, para lo que se está pasando a utilizar una tercera frecuencia, la L5 a 1176.45 MHz y nuevas señales civiles (L1C, L2C y L5) y militares (L1M y L2M).

3.3.GLONASS

El sistema de navegación GLONASS fue la respuesta soviética al GPS americano. Se empezó a desarrollar en el año 1983 y llegando a ser completamente operacional en el año 1993. No obstante, debido a los problemas económicos de la neófito Federación Rusa, se redujo considerablemente el presupuesto en el programa espacial y el sistema cayó en mal estado pudiendo mantener apenas unos 8 satélites operativos.

Sin embargo, al comienzo del siglo XXI, se retomó el interés por GLONASS y se desarrolló un plan de modernización para lanzar una nueva generación de satélites, empezando en 2003.

La constelación GLONASS transmite en dos bandas de frecuencia: la G1 a 1.6 GHz y la G2 a 1.25 GHz. Existe el planteamiento de una tercera frecuencia G3 para obtener mayor precisión.

Los servicios ofrecidos por GLONASS son dos:

- **SPS:** Del inglés Standard Positioning Service (Servicio de Posicionamiento Estándar), es el servicio gratuito para uso civil, transmitido por la señal G1 y por la G2 desde 2004.
- **PPS:** Precise Positioning Service (Servicio de Posicionamiento Preciso) es el servicio restringido a uso militar y usuarios autorizados. Dos señales distintas están disponibles en las frecuencias G1 y G2.

3.4. Galileo

Galileo es el nombre del programa europeo de sistema GNSS. Es un proyecto financiado por la Unión Europea cuyo objetivo es tener en Europa un sistema independiente del americano y del ruso, aunque interoperable con ambos. Una serie de retrasos sucesivos ha impedido que se encuentre completamente operacional, aunque se prevé que lo sea en los próximos años.

Galileo constará de cuatro frecuencias: E5a, E5b, E6 y E1 y proveerá los siguientes servicios:

- **Open Service (OS):** Es el servicio público y gratuito de Galileo. Tendrá una precisión de alrededor de un metro.
- **Commercial Service (CS):** Será un servicio encriptado que ofrecerá precisión centimétrica, pensado para desarrollo de aplicaciones y empresas que estén dispuestas a pagar para obtener un mejor rendimiento que con el Open Service.
- **Public Regulated Service (PRS):** Este servicio está pensado para aplicaciones gubernamentales importantes como infraestructuras estratégicas (energéticas, telecomunicaciones, finanzas) o seguridad nacional, por lo que también estará encriptado y será accesible solamente para usuarios autorizados.
- **Search and Rescue Service (SAR):** Es el servicio de Galileo destinado a buscar y rescatar personas en situaciones de riesgo, detectando señales de emergencia y enviando mensajes de ayuda.
- **Safety of Life Service (Sol):** Se trata del servicio más importante para el sector de la aviación, puesto que, junto con EGNOS, mejora considerablemente el rendimiento del OS y permite utilizarlo en sectores como el citado cumpliendo con los requisitos necesarios.

Segment Service		Aviation	Maritime	Rail	Surveying/ Mapping	Agriculture	Road	LBS
		E G N O S	Open Service					
Safety of Life								
G A L I L E O	Open Service							
	OS/CS Authentication							
	CS High Precision							
	Public Regulated Service							
	Search and Rescue							

Operational

Galileo Early Services

Galileo FOC/
EGNOS V3

Figura 3.2: Señales EGNOS y Galileo

3.5. Beidou

El sistema de navegación por satélite Beidou (BDS: BeiDou Navigation Satellite System) es el programa en desarrollo por el gobierno chino que pretende ser completamente operacional para 2020.

Desde finales de 2011, el sistema ya da cobertura a la región Asia-Pacífico con una constelación de 15 satélites (6 GEO: Geostationary Earth Orbit, 5 IGSO: Inclined Geosynchronous Orbit y 4 MEO: Medium Earth Orbit). En 2015, se lanzaron los satélites 17, 18, 19 y 20 de la constelación, que permitían la expansión de la señal de Beidou a nivel global. En 2016, ya se han lanzado dos satélites más de la constelación (22 en total), continuando así con la fase III del proyecto que planea completarse para 2020, cuando se alcance la operatividad total del sistema y éste conste de un total de 5 satélites geoestacionarios y 30 no geoestacionarios (27 MEO y 3 IGSO).

Además, se tiene previsto que el sistema Beidou sea interoperable con el resto de sistemas GNSS para que sean compatibles. Poseerá servicios de Open Service gratuito para cualquier usuario y Authorized Service de más precisión para usuarios autorizados.

3.6.IRNSS o NAVIC

El sistema IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) se diferencia de los sistemas vistos hasta ahora en que se trata de un sistema regional, es decir, no poseerá un área de servicio global, sino que su área será de en torno a 1500 kilómetros alrededor de la India.

El programa está financiado por el gobierno de la India y posee 7 satélites. Tres GEO y cuatro GSO para conseguir la mejor cobertura regional con el menor número de satélites. El proceso de lanzamiento se completó en abril de este año, cambiando el nombre de IRNSS a NAVIC, con lo cual se considera operativo actualmente.

Provee dos tipos de servicios, uno gratuito y otro más preciso para usuarios autorizados en bandas de frecuencia L5 (1176.45 MHz y S (2492.08 MHz).

3.7.QZSS

El último de los sistemas de navegación por satélite existentes es el QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), desarrollado por el gobierno japonés desde 2002. Se trata, al igual que el sistema IRNSS, de un sistema regional que da cobertura a la región del este de Asia y Oceanía.

Se compone de 3 satélites en órbitas HEO (Highly Elliptical Orbit), lo que permite que siempre se encuentre uno de los tres en el zenit encima de Japón, aumentando la cobertura en esta región. Está previsto lanzar cuatro satélites GEO para conseguir en el futuro una constelación de 7 satélites en vez de los 3 iniciales. Actualmente, hay 7 satélites en órbita y se prevé que, para finales de 2017, se hayan lanzado 3 adicionales (2 QZS y 1 GEO).

3.8.Sistemas de aumentación

Como ya se ha visto, los sistemas globales de navegación por satélite, permiten obtener la posición en cualquier lugar con receptores sencillos. Sin embargo, para ciertas aplicaciones, es necesaria una mayor precisión en las medidas, además de otros requerimientos que se verán más adelante.

Los sistemas de aumentación se utilizan para obtener mejores prestaciones. Éstos emplean dispositivos de los que se conoce con gran precisión su posición y permiten calcular la diferencia entre la medida real y la observada, así como las correcciones de las medidas de pseudorange de los satélites, que posteriormente son enviadas a los usuarios para mejorar su posición. En la actualidad existen tres tipos de sistemas de aumentación:

- **ABAS (Aircraft Based Augmentation System):** Sistema de aumentación caracterizado por tener a bordo de la aeronave todo el equipamiento necesario para la aumentación. Proporciona la integridad necesaria con los equipos RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), que permite detectar si hay un fallo de integridad en algún satélite observable, y el equipo FDE (Fault Detection and Exclusion) que excluye las medidas defectuosas de los cálculos. Es utilizado en la fase de ruta y en salidas y llegadas.
- **GBAS (Ground Based Augmentation System):** Es un sistema de aumentación en el que el equipo que transmite las correcciones se compone de estaciones situadas en tierra. Se desarrolló para la aviación y ofrece precisiones muy altas, pero su alcance no supera unos pocos kilómetros alrededor de la instalación. Se utiliza en aproximaciones de precisión, salidas y fase de taxi.
- **SBAS (Satellite Based Augmentation System):** Por último, el sistema SBAS, que transmite las correcciones mediante el uso de satélites, que se explicará más detalladamente a continuación, haciendo hincapié en EGNOS, el SBAS europeo. Usado en todas las fases de vuelo, incluidas las aproximaciones con guiado vertical LPV-200.

4. SBAS

El SBAS es el sistema de aumentación más extendido para la aviación civil, requerido para cumplir con los requisitos impuestos por la OACI en la navegación por satélite en las distintas fases de vuelo.

El funcionamiento básico de los sistemas SBAS está basado en la transmisión de las correcciones diferenciales necesarias para mejorar la señal por satélites geostacionarios, a los que llega la información a través de estaciones que calculan continuamente estas correcciones. Un sistema SBAS está formado por los siguientes segmentos:

- **Segmento espacial:** Formado por los satélites geostacionarios que envían la señal aumentada a los receptores de señal GNSS en la misma frecuencia que la señal convencional de GNSS.
- **Segmento tierra:** Constituido por un gran número de estaciones de referencia que reciben y monitorizan la señal GNSS, enviando las observaciones a una estación donde se calculan las correcciones y se forma el mensaje SBAS, posteriormente enviado a estaciones llamadas Uplink Station, que envían esta información a los satélites.
- **Segmento usuario:** Está formado por cualquier receptor SBAS, el cual recibe simplemente los datos ya corregidos para mejorar su posicionamiento.

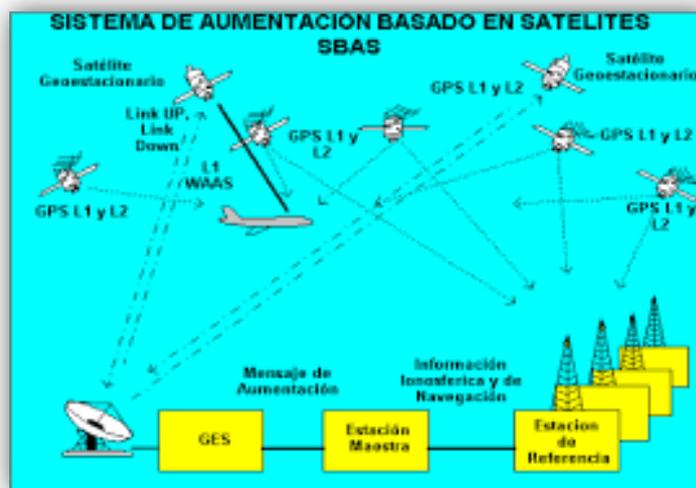


Figura 4.1: Arquitectura de sistema SBAS

4.1. Fundamentos matemáticos

Los fundamentos matemáticos del SBAS parten de la base del GPS diferencial con pseudorangos de código, cuyo valor para una estación A y un satélite j se puede modelar por la ecuación:

$$R_A^j(t_o) = \rho_A^j(t_o) + \Delta\rho_A^j(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_A(t_o)$$

Donde R es el pseudorango, ρ es la distancia geométrica entre la estación y el satélite, $\Delta\rho$, los efectos de error radial de la órbita y de refracción ionosférica/troposférica y δ , el error de los relojes.

Introduciendo la corrección del pseudorango para el satélite j en un tiempo de referencia t_0 :

$$PRC^j(t_o) = -R_A^j(t_o) + \rho_A^j(t_o) = -\Delta\rho_A^j(t_o) + c\delta^j(t_o) - c\delta_A(t_o)$$

A partir de una serie temporal de datos de correcciones de pseudorangos, se puede calcular la corrección de variaciones de distancia RRC. De este modo, la corrección de pseudorangos en una época cualquiera se puede aproximar por:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_o) + RRC^j(t_o)(t - t_o)$$

Procediendo del mismo modo para una segunda estación B:

$$R_B^j(t_o) = \rho_B^j(t_o) + \Delta\rho_B^j(t_o) - c\delta^j(t_o) + c\delta_B(t_o)$$

Y aplicando la corrección de pseudorangos se tiene:

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t))$$

Donde se observa que desaparecen los errores de los satélites. Despreciando los errores radiales de las órbitas, se tiene:

$$R_B^j(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + \Delta\delta_{AB}(t)$$

Donde se tiene el término:

$$\Delta\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$

Que es el error combinado de los relojes de los receptores. Aquí los efectos de desplazamiento de reloj de satélite, degradación de órbita y errores ionosféricos y troposféricos se han eliminado prácticamente.

Actualmente, existen cuatro tipos de sistemas SBAS: WAAS, MSAS, GAGAN y EGNOS.

4.2.WAAS

El sistema WAAS (Wide Area Augmentation System) es el sistema de aumentación por satélite estadounidense. El programa comenzó su desarrollo en 1992 por la FAA (Federal Aviation Agency) y está especialmente diseñado para la navegación aérea. El sistema fue declarado completamente operacional en 2003.

Su estructura y objetivos de ofrecer precisión, integridad, continuidad y disponibilidad son la referencia para el resto de sistemas SBAS presentes en el mundo. Actualmente, WAAS cumple con los requisitos en los siguientes procedimientos de vuelo:

- LNAV/VNAV (Lateral Navigation/Vertical Navigation)
- LP (Localizer Performance)
- LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance)
- LPV-200 (Localizer Performance with Vertical Guidance para CAT I de precisión).

4.3.MSAS

El MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) es el sistema SBAS japonés, que utiliza los satélites de navegación japoneses para obtener las correcciones y dispone de las estaciones en tierra para generar el mensaje SBAS y de 2 satélites geoestacionarios para enviar las correcciones al usuario. Está operativo desde 2007 y permite la interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS.

4.4.GAGAN

GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) es el sistema de SBAS de la India que comenzó a ser diseñado en 2001 y empezó a ser operativo a principios del año pasado. También permite la interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS, y posee tres satélites geoestacionarios para enviar los mensajes SBAS.

4.5.EGNOS

El último de los sistemas SBAS, que se verá con mayor profundidad, es el de EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), desarrollado a tres bandas por la Unión Europea, la ESA (European Space Agency) y la empresa EUROCONTROL.

La arquitectura de EGNOS sigue el estándar de todos los sistemas SBAS con algunas peculiaridades. Consta de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento tierra y el segmento usuario.

4.5.1. Segmento espacial

El segmento espacial de EGNOS se compone de los satélites geoestacionarios que forman la constelación, con el objetivo de transmitir en el área europea las correcciones calculadas a los usuarios. Actualmente hay 2 satélites EGNOS completamente operativos, 1 en fase de pruebas y otro en fase de retirada. Cada uno de ellos es identificado, al igual que los satélites de una constelación GNSS convencional, por su PRN (Pseudo Random Noise), único para cada satélite.

- PRN 120: Inmarsat-3 AOR-E (Atlantic Ocean Region East). Es uno de los satélites completamente operativos.
- PRN 124: Artemis. Fue lanzado en 2001 y está en fase de retirada.
- PRN 126: Inmarsat-4 F2 EMEA (Europe Middle East Africa). En fase de pruebas.
- PRN 136: Astra SES (Sirius-5). Es el otro de los satélites completamente operativo.

4.5.2. Segmento tierra

El segmento tierra de EGNOS es el más complejo de todos y el que permite crear y enviar el mensaje SBAS de EGNOS. Está dividido en 4 tipos de infraestructuras distintas: Las RIMS, los MCC, los NLES y las PACF/ASQF.

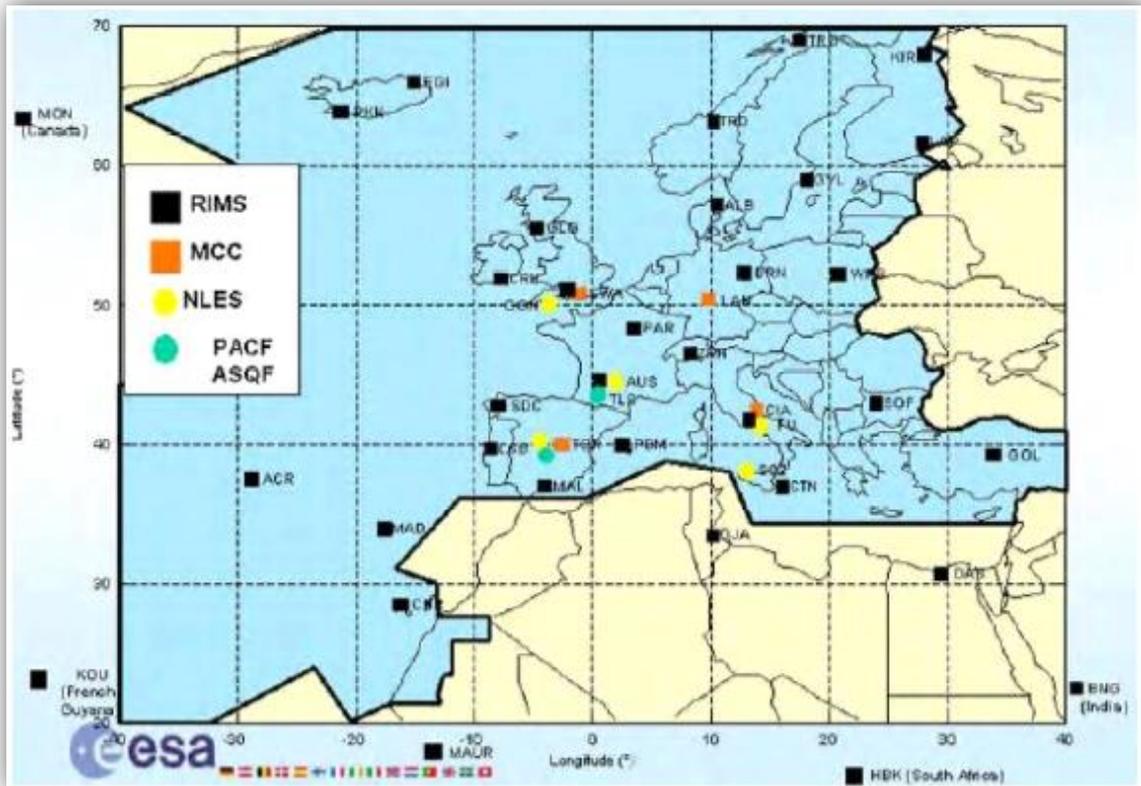


Figura 4.2: Arquitectura del segmento terrestre EGNOS

- **RIMS (Ranging Monitoring Stations):** Situadas por todo el continente europeo, además de Canadá y Sudáfrica, son las encargadas de monitorizar las señales recibidas de las constelaciones GNSS (GPS, GLONASS y en un futuro Galileo) en antenas de las que se conoce su posición con gran exactitud y enviar esta información a los MCC. Hay dos tipos de RIMS: las RIMS A, que recogen los datos y generan la corrección y las RIMS B, que recogen datos y comprueban esta corrección.
- **MCC (Mission Control Centres):** Existen 4 centros de control situados en Madrid, Londres y cercanías de Roma y Frankfurt. Todos ellos tienen como misión realizar los cálculos necesarios a partir de los datos obtenidos por las RIMS. Dentro de los

MCC existen dos tipos de módulos: el CPF (Central Processing Facility) destinado a elaborar las correcciones y estimación de errores en el mensaje, y el CCF (Central Control Facility) que supervisa el sistema y se encarga de guardar los datos generados.

- **NLES (Navigation Land Earth Stations):** Son las estaciones encargadas de enviar los mensajes de navegación a los satélites geoestacionarios. Existen 2 de ellas por cada satélite geoestacionario operativo de EGNOS, estando situadas dos en Goonhilly (Reino Unido) y una en Aussaguel (Francia), Fucino y Scanzano (Italia) y Torrejón (España).
- **PACF/ASQF (Performance Assessment and Check-out Facility/Application Specific Qualification Facility):** Son infraestructuras de apoyo diseñadas para operaciones de mantenimiento y verificación. Hay 2, una situada en Madrid y la otra en Toulouse.

4.5.3. Segmento usuario

El segmento usuario es la última parte de la arquitectura de EGNOS y está constituido por cualquier usuario equipado con un receptor capaz de captar la señal de EGNOS. A través del servicio EGNOS Data Access Service (EDAS) también se puede acceder a los datos proporcionados por EGNOS, como se explica más adelante.

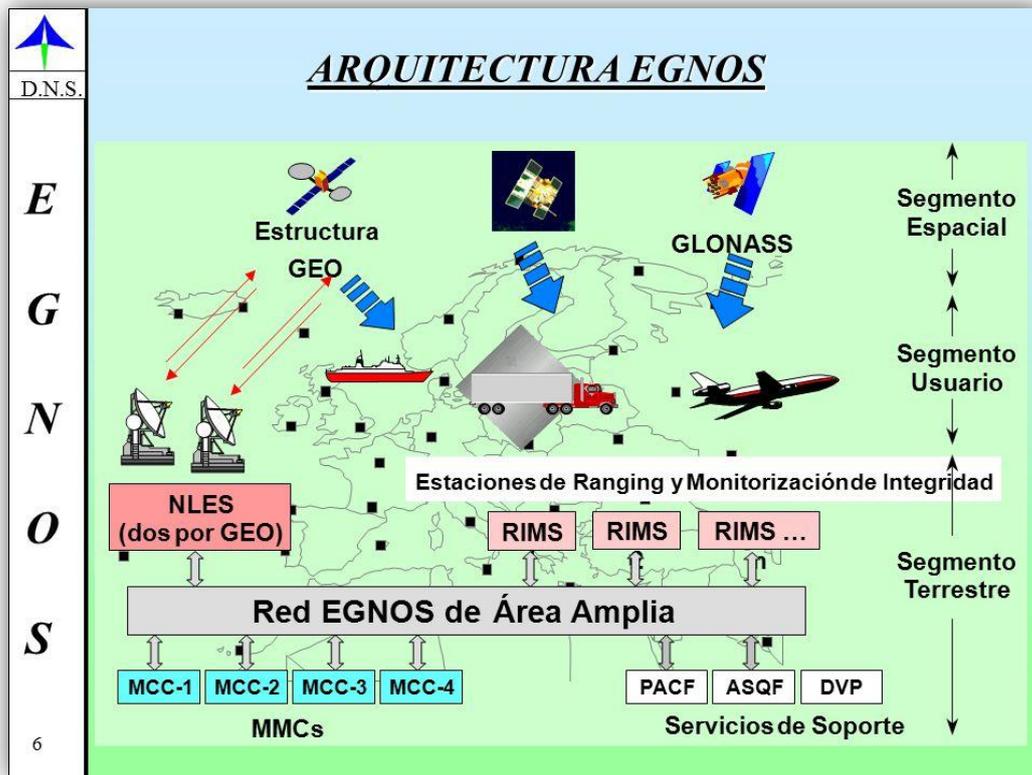


Figura 4.3: Arquitectura de EGNOS

4.5.4. Mensaje EGNOS

El mensaje de EGNOS se compone de 250 bits divididos en:

- 8 bits de preámbulo. Existen 3 tipos distintos de preámbulo.
- 6 bits que indican el tipo de mensaje.
- 212 bits que contienen la información de los mensajes.
- 24 bits finales o bits de paridad utilizados para la detección de errores.

Hay 17 tipos de mensaje distintos en EGNOS, tal y como están descritos en la siguiente tabla:

TIPO DE MENSAJE	DESCRIPCION
MT1	Proporciona datos de la máscara PRN
MT2-MT5	Proporciona correcciones rápidas
MT24	Proporciona correcciones rápidas y a largo plazo
MT25	Proporciona correcciones a largo plazo
MT24	Proporciona correcciones rápidas y a largo plazo
MT26	Proporciona correcciones ionosféricas
MT18	Principio de la máscara asociado a correcciones ionosféricas (IGP)
MT6	Información sobre integridad
MT7	Factores de degradación para correcciones rápidas
MT10	Factores de degradación para correcciones <u>ionosféricas</u> y a largo plazo
MT12	Parámetros de sincronización entre ENT y UTC
MT17	Emite almanaques de los tres satélites
MT9	Transmite posición, velocidad y aceleración de los satélites
MT27	Aumenta el valor de <u>σ_{UDRE}</u>
MT28	Ampliación del mensaje MT27
MT62	Mensaje sin contenido
MT63	Mensaje tipo nulo

Figura 4.4: Tipos de mensaje EGNOS y descripción

Un aspecto fundamental de un sistema SBAS, son los valores de rendimiento que ofrece al usuario, principalmente de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. En la siguiente sección del índice se realizará una explicación de estos y los rangos de valores que ofrece EGNOS.

5. PBN

A continuación se procede a explicar la relación existente entre PBN y los sistemas GNSS. Para ello, es necesario explicar, brevemente, conceptos como RNAV, PBN y las operaciones que se realizan bajo estos requerimientos.

5.1. Concepto PBN

El concepto PBN especifica que los resultados de performance de los sistemas RNAV o RNP de las aeronaves se definan en función de la precisión, integridad, continuidad y funcionalidad necesarias para las operaciones propuestas en espacio aéreo particular. El concepto PBN supone un cambio de navegación basada en sensores a navegación basada en la performance.

En este sentido, una especificación para la navegación es un conjunto de requisitos relativos a la aeronave y tripulación de vuelo necesarios para dar apoyo a una aplicación de navegación para un determinado contexto. Dicha especificación define el rendimiento requerido del sistema RNAV o RNP, así como todos los requisitos funcionales (capacidad de realizar procedimientos de trayectoria curva o volar por rutas paralelas desplazadas). Existen dos especificaciones:

- **RNAV (aRea NAVigation):** Navegación basada en la navegación de área que no incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo. Permite a las aeronaves elegir cualquier ruta dentro de una red de balizas de navegación, de cuya posición es independiente. Se designa por el prefijo RNAV seguido del nivel de precisión lateral durante el 95% del tiempo de vuelo (en NM). Existe RNAV en 2D (horizontal), 3D (horizontal y vertical) y 4D, que añade el tiempo a RNAV 3D.

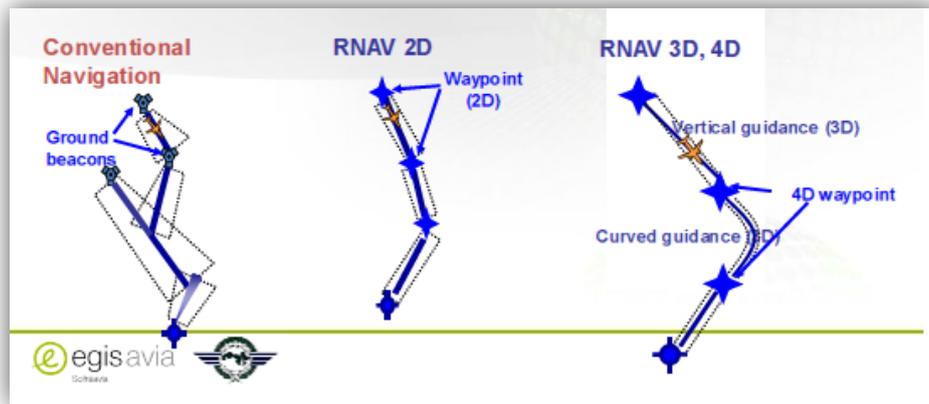


Figura 5.1.: Especificación RNAV

- RNP (Required Navigation Performance):** Especificación para la navegación de área que incluye el requisito de vigilancia y alerta del rendimiento a bordo. Se designa por medio del prefijo RNP seguido del grado de precisión lateral durante el 95% del tiempo de vuelo e integridad requerida (en NM).

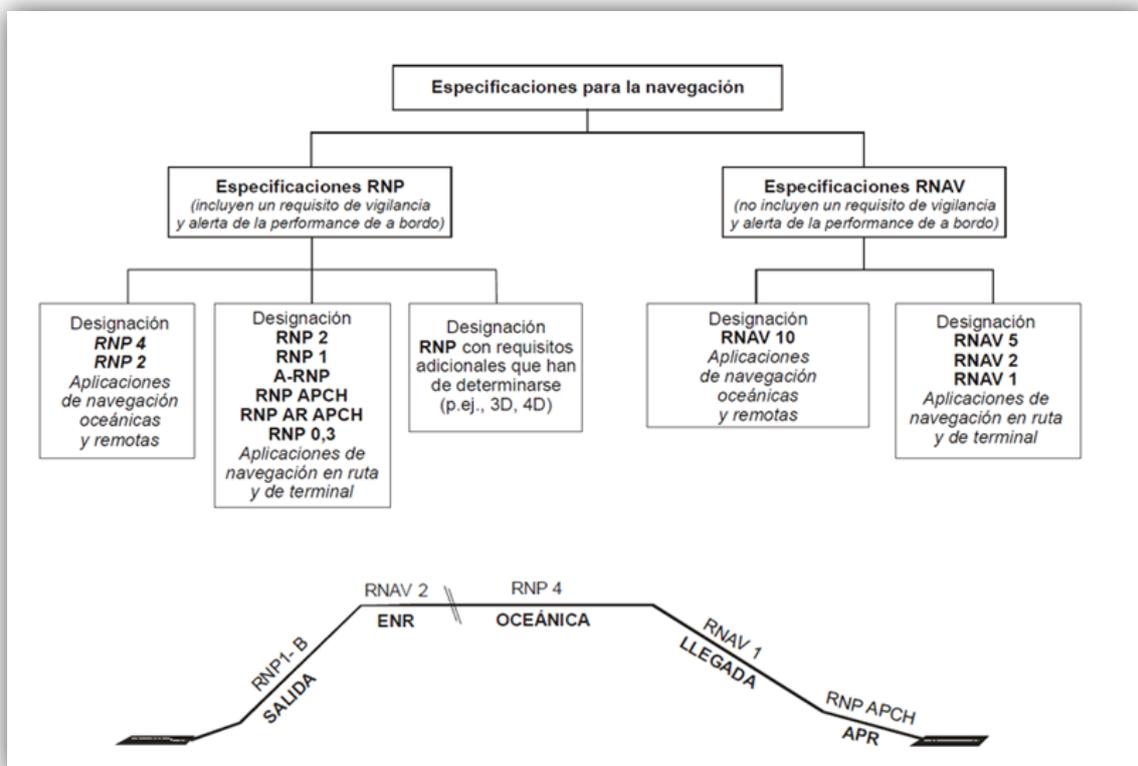


Figura 5.2: RNP y RNAV en las fases de vuelo

Es importante saber que RNP fue sustituido por el concepto PBN cuando éste se introdujo tras la decimoprimer Conferencia de Navegación Aérea de 2004. Los beneficios de la navegación basada en requerimientos son:

- Reducción de la necesidad de mantener rutas y procedimientos en función de sensores específicos, y los costos conexos.
- Evita el desarrollo de operaciones en función de los sensores cada vez que evolucionan los sistemas de navegación, lo que podría ser un costo prohibitivo.
- Uso más eficiente del espacio aéreo (rutas, ahorro de combustible y reducción de ruido).
- Aclara la forma en que se usan los sistemas RNAV y RNP.
- Facilita el proceso de aprobación operacional de los explotadores proporcionando un conjunto limitado de especificaciones para la navegación previstas para uso mundial.

5.2.Operaciones PBN

Tras la trigésimo sexta asamblea de OACI de octubre de 2007, se llegó a la resolución A36-23, que pedía a los estados miembros la publicación de un plan de implementación para operaciones PBN que incluyese las fases de en ruta, terminal y aproximación. También se requería la publicación de APV (Approach with Vertical guidance) en cada pista instrumental para 2016. Esto suponía una mejora de la seguridad en operaciones de aproximación.

Por otro lado, en la trigésimo séptima asamblea de octubre de 2010, la resolución alcanzada (A37-11) requería, por un lado, la implementación de APV en todas las pistas instrumentales. También estableció unos objetivos temporales para alcanzar el 30% de dicha implantación en 2010, el 70% en 2014 y el 100% en 2016, lo que aún no ha sido posible. Las excepciones que permitían únicamente la implantación de LNAV debían incluir aeropuertos que no presentasen altímetro disponible o casos en los que la aeronave no estuviese equipada para procedimientos APV.

De este modo, se establecieron las especificaciones mostradas a continuación para las diferentes fases de vuelo:

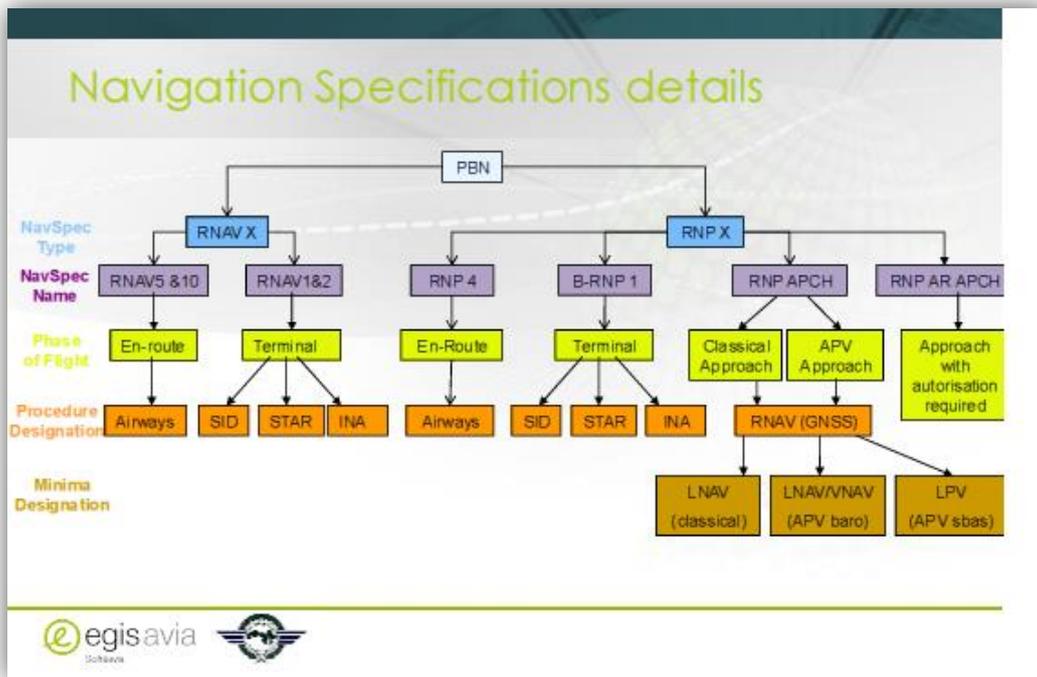


Figura 5.3: Especificaciones PBN

Que, focalizadas en aproximaciones, ya que es el tema tratado en este Trabajo de Fin de Grado:

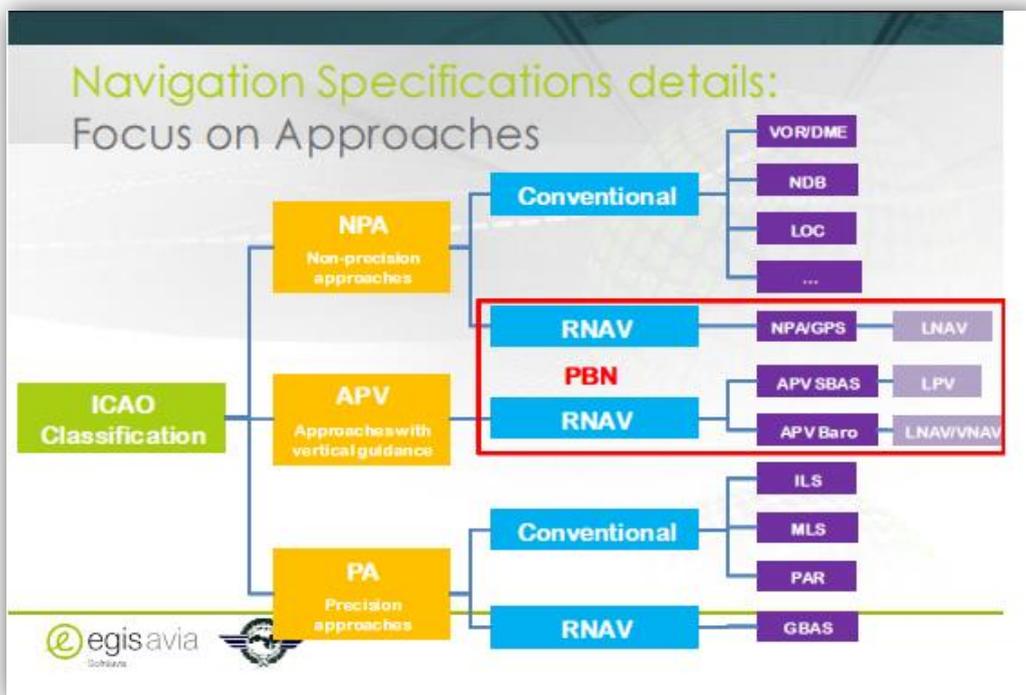


Figura 5.4: Especificaciones PBN APP

En cuanto al guiado vertical en dichas operaciones de aproximación:

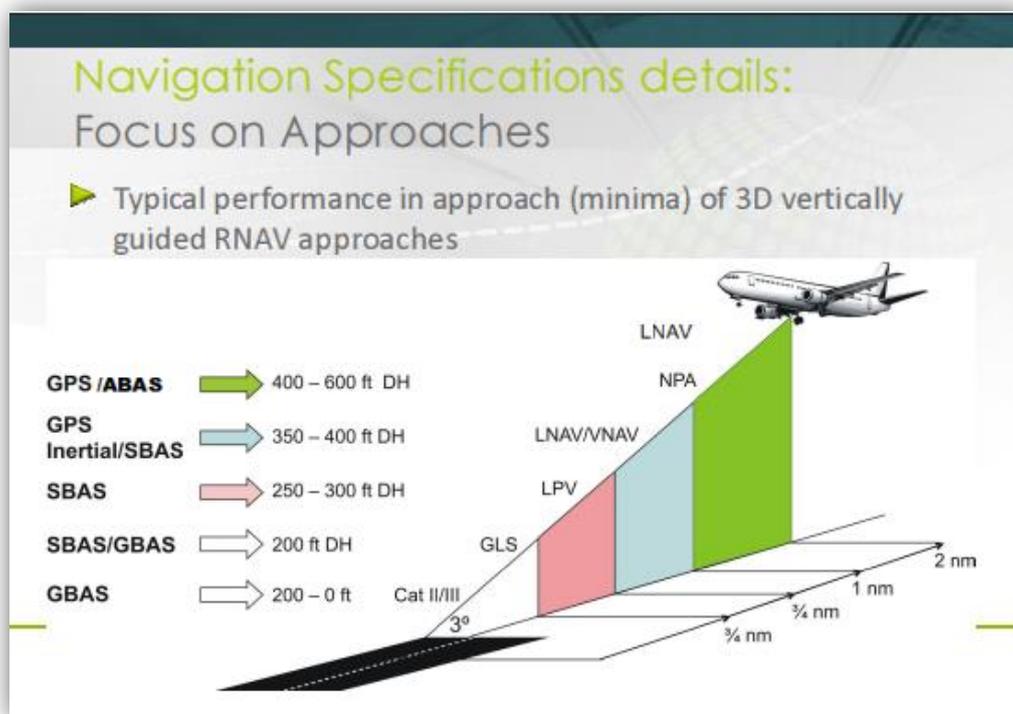


Figura 5.5: Especificaciones 3D

Interesa, concretamente el caso SBAS LPV, ya que es el tratado. Pese a que en la Figura 5.5 se establece una altura de decisión de 250 ft como mínimo, LPV-200, como se verá más adelante, presenta una DH de 200 ft.

5.3.PBN y GNSS

Para concluir con PBN, es importante relacionar PBN con GNSS para entender cómo los sistemas de navegación por satélite contribuyen a la implementación de este tipo de navegación basada en requerimientos.

A día de hoy, la implementación GNSS ha permitido cambiar la forma en la que se define el espacio aéreo. Por su parte, PBN se beneficia de forma directa de los bienes de estos sistemas, a excepción de GBAS debido al tipo de señal que presentan. Esto se debe a que no presentan, salvo la ya mentada excepción, infraestructura terrestre.

De esta forma, GNSS se puede emplear para todas las operaciones PBN, desde la fase de en ruta, en la que presenta grandes beneficios en la separación, particularmente en regiones oceánicas en las que no existen balizas “en tierra”; pasando por la terminal. En este último caso, la precisión requerida está entre RNAV 1 y RNAV 2, empleando tanto GNSS como DME/DME, aunque este último requiere una gran cobertura, mientras que GNSS suele estar 100% disponible para este tipo de operaciones. También incluye precisión B-RNP 1 (Basic -RNP, menos preciso que Precise-RNP), basada en GNSS como sistema de navegación primario. En cuanto a la fase de aproximación, se hace uso de los sistemas de aumentación SBAS y ABAS dependiendo del tipo de guiado empleado, tal y como se muestra a continuación.

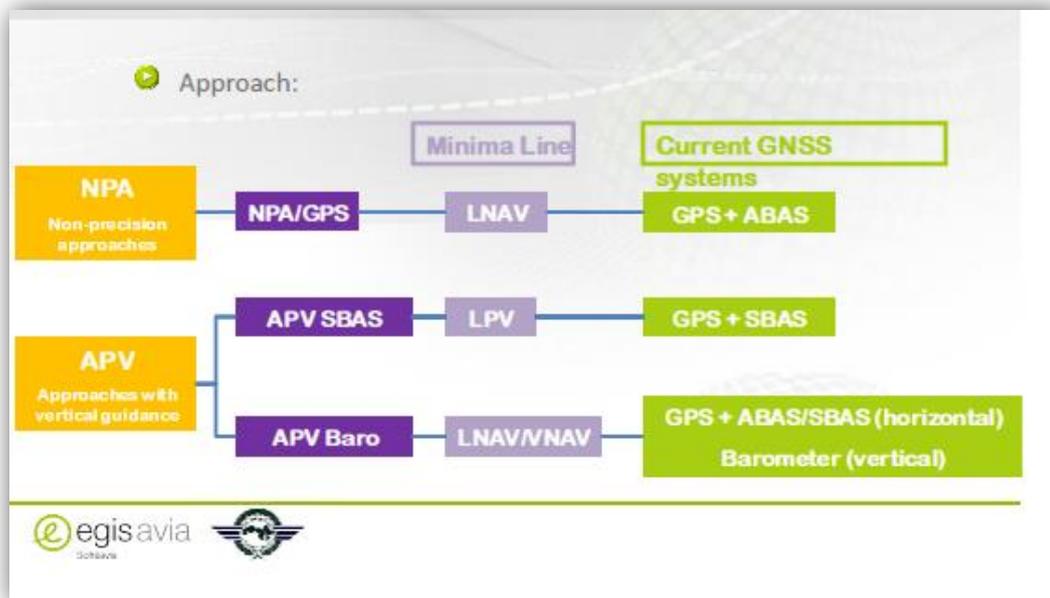


Figura 5.6: GNSS en fase de aproximación

Como conclusión, se puede afirmar que GNSS es la clave para la implementación de PBN. Conforme la tecnología evoluciona, PBN lo hace también. Los avances futuros en materia de incluyen el aumento de segmentos curvos para otras fases distintas al segmento de aproximación; especificación RNP 3.0 para rutas bajas, especialmente para aeronaves de ala rotatoria; y la nueva especificación A-RNP (Advanced-RNP), basada en precisión de navegación escalable, cubriendo todas las fases de vuelo para habilitar la reducción del espacio dedicado a las rutas tanto en segmentos curvos como en rectos. La evolución debe ser conjunta con PBN a diferentes niveles: equipamiento, estándares y entrenamiento de tripulación y ATC. OACI ayuda a los estados en la implementación de PBN, a nivel tanto nacional como internacional, a través de reuniones y material guía.

6. SESAR

SESAR (Single European Sky ATM Research) es un proyecto conjunto de la comunidad de transporte aéreo europea cuyo objetivo es la implantación de una red ATM en Europa de altas prestaciones para 2020. El proyecto nació de la necesidad de crear una visión integrada y común sobre la evolución del sistema de gestión del tránsito aéreo, para así acomodar el incremento de demanda previsto para los próximos años mediante la implantación de nuevos procedimientos.

Consta de 3 fases expuestas a continuación.

6.1.Fase de Definición

Tuvo lugar entre 2006 y 2008. Su objetivo principal es la elaboración de un Plan Maestro Europeo de Gestión del Tráfico Aéreo. Fue ejecutada a manos de un consorcio contratado por EUROCONTROL en el que estaban representadas las empresas y organizaciones de mayor relevancia dentro del sector de transporte aéreo europeo. Dichas empresas y organizaciones incluyen aerolíneas como Lufthansa, fabricantes como Airbus, aeropuertos como los de ENAIRE y proveedores de servicios de Navegación Aérea como la ya citada ENAIRE.

6.2.Fase de Desarrollo

Se encuentra activa (2009-2016) y ejecutando las tareas de investigación, desarrollo y validación recogidas en el Plan Maestro ATM. Estas actividades se financian a través de la Empresa Común SESAR (SJU), responsable final del mantenimiento del Plan Maestro ATM y del desarrollo del futuro sistema ATM Europeo.

En la SJU, además de los socios fundadores (CE y EUROCONTROL), están representados los principales actores del ATM europeo: proveedores de servicios de Navegación Aérea, miembros de la industria fabricante del sector, industrias y aeropuertos. El área de operaciones aeroportuarias se encuentra liderado por ENAIRE.

6.3.Fase de Despliegue

Esta fase comenzó en 2014 y se espera que finalice en 2020. Supone el despliegue de las actividades incluidas en el IDP (Interim Deployment Programme). La acción tiene como objetivo producir actividades de despliegue coordinado con la participación de los principales proveedores de servicio de Europa, dirigidas a la mejora de los beneficios de rendimiento de la red y de los usuarios finales.

Con respecto a la implantación global del IDEP, el proyecto quiere fomentar la ejecución de cinco de las siete áreas de actividad incluidas en el IDP:

- Área de actividad 2: Mejoras de la gestión del espacio aéreo e intercambio de datos.
- Área de actividad 3: CDM en aeropuertos.
- Área de actividad 4: Enlace de datos aire-tierra.
- Área de actividad 5: Asistencia automatizada a los controladores para una coordinación, transferencia y diálogo sin discontinuidades.
- **Área de actividad 6: Aproximaciones RNP.**

Esta última área incluye las operaciones de aproximación con LPV-200, suponiendo la unificación de los requisitos y operaciones a nivel Europeo.

6.4.NextGen

Next Gen es el proyecto análogo a SESAR en EEUU a cargo de la FAA (Federal Aviation Administration). Su objetivo es la unificación del cielo americano, de la misma forma que el de SESAR es la unificación del cielo europeo. Actualmente, Next Gen y SESAR serán interoperables, acuerdo que entró en vigor en 2011.

7. LPV-200

7.1.Descripción

La agencia del GNSS europeo (GSA) ha puesto en marcha una nueva tecnología que ofrece a los pilotos instrumentos mejorados para aterrizajes de aviones más seguros, incluso en condiciones meteorológicas adversas de categoría I. El anuncio se realizó en el taller anual de EGNOS (Service provision workshop).

LPV-200 es un nivel de servicio EGNOS que permite las aproximaciones 3D instrumentales de tipo A o B basadas en SBAS de acuerdo a lo estipulado en el Anexo 10 de OACI para aproximaciones de precisión de Categoría I con requerimientos de SIS (Signal In Space) y VAL (Vertical Alert Limit) de 35 m (equivalente a ILS CAT I). La altura de decisión de dicho sistema es de 200 ft (61 m) y las aproximaciones realizadas empleando dicho sistema son, como ya se ha mencionado, de tipo instrumental y de precisión (IAP o Instrument Approach Procedure). Proporciona información precisa sobre el enfoque de una aeronave a una pista con el uso de tecnología de posicionamiento GNSS, así como guiado vertical y lateral sin la necesidad de contacto visual con el suelo de la aeronave hasta alcanzar una altura de 200 pies (61 metros).

La altura de 200 pies se corresponde con la altura de decisión. Estos sistemas de aproximación basados en sistemas EGNOS se consideran como aproximaciones con ILS, pero sin necesidad del enorme gasto que supone instalar el sistema de tierra. EGNOS LPV 200 proporciona todas las ventajas de una aproximación ILS CAT I, además de la flexibilidad de una aproximación basada en PBN.

- Reducción de los riesgos asociados con el aterrizaje en condiciones de mal tiempo.
- Mejor accesibilidad a los aeropuertos.
- Reducción de retrasos, desvíos y cancelaciones.
- Mantenimiento de los niveles de seguridad.
- Mayor robustez frente a perturbaciones ionosféricas, lo que supone un aumento de la cobertura.
- En un horizonte más allá de 2015 se espera mejorar el sistema para conseguir la cobertura completa de EU-28; aumento de dicha cobertura por encima de los 72° N y mejora de la capacidad de monitoreo de GPS SV.

- Mejora de la eficiencia de las operaciones, reduciendo el consumo de combustible, emisiones de CO₂ y disminución del impacto medioambiental de la aviación.

Los requisitos de LPV-200 son más estrictos que los de APV-I. Como ya se sabe, LPV-200 pertenece a la APV. La diferencia entre APV-I y LPV-200 radica en que, el primero de ellos presenta mínimos menos restrictivos, es decir, menos precisión, aunque también hace uso de sistemas SBAS.

7.2. Beneficios en su utilización

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, el sistema LPV-200 se emplea en aproximaciones instrumentales de precisión de tipo A o B, equivalentes a un ILS de CAT I.

Se enuncian a continuación los beneficios que presenta dicho sistema en su funcionamiento:

- Provee de guiado lateral y vertical sin contacto visual del suelo hasta una altura de decisión de 200 ft.
- Habilita RNP APCH con los mínimos de LPV hasta los 200 ft y proporciona ayuda en los procedimientos de aproximación 3D de tipo A y B de CAT I.
- Habilita las aproximaciones de precisión donde aún hoy no es posible realizarlas.
- Presenta mínimos en DH (Decision Height) menores que para APV-Baro.
- Presenta menor impacto operacional manteniendo los niveles de seguridad.

Todo esto se traduce en un mayor número de beneficios tanto directos como indirectos.

En cuanto a los requisitos de disponibilidad de LPV-200, se establece que para un nivel de protección (xPL) menor que el nivel de alerta (xAL), de acuerdo a la probabilidad de que el VNSE exceda los mínimos:

- 10 m en operación con condiciones de sistema nominal, establecidas a 10^{-7} /por aproximación.
- 15 m para operación con condiciones de sistema degradado a 10^{-5} /por aproximación.

Los requisitos de continuidad son los mismos que los establecidos para disponibilidad.

Por otro lado, es importante hablar de los problemas que resuelve el sistema LPV-200:

- Seguridad en los horarios en vuelos chárter o programados debido a la ausencia de ayudas tradicionales de aproximación en tierra en destinos remotos.
- Coste de nueva infraestructura (ILS presenta en este aspecto mayor coste de infraestructura y mantenimiento).
- Gasto de combustible en aproximaciones de no precisión (ahorro).
- Debilidades de ILS:
 - Área “limpia”.
 - Alineación con la pista.
 - Fallos de equipamiento ILS en tierra.
 - Problemas ocasionales con la senda de planeo provocando perturbaciones.
- Reducción del mantenimiento del aeropuerto al eliminar instalaciones ILS.
- Sustitución de ILS CAT I.

En cuanto a los beneficios operacionales:

- Se parece a ILS.
- Permite la implementación de requisitos RNAV.
- Se encuentra en un proceso de expansión global.
- Supone un ahorro inmediato con su implantación.
- La instalación en todas las aeronaves es razonable y alcanzable.
- Existencia del CMA-5024, un servicio certificado y probado de aerolíneas con LPV.
- Se reduce la dependencia de radioayudas terrestres.
 - Mejora en SIDs que emplearán SBAS.
 - Mejora en STARS con SBAS y LPV.
 - Si el ILS está fuera de servicio se puede seguir usando LPV.
- Seguridad mejorada debido al guiado vertical.
- Ausencia de errores en la captura de la senda de planeo.
- Sin limitaciones debido al frío.

Y los beneficios que presenta la infraestructura incluyen la independencia de la variación en el terreno, que no afecta a la precisión de la aproximación. Por otro lado, no requiere mantenimiento al tratarse de un sistema basado en satélite. Además, presenta interoperabilidad con el resto de sistemas SBAS, con lo que tan solo necesita un receptor para dichos sistemas.

Países como EE UU que ya han implantado dicho sistema, como se verá a continuación, han publicado las ventajas ya observadas y obtenidas de dicha implantación. La FAA publicó en 2004 que el uso de LPV-200 supuso una reducción en los mínimos de las operaciones, así como la integridad suficiente durante el procedimiento. El aumento de los instrumentos de aproximación disponibles fue significativo.

7.3.Funcionamiento

Como ya se ha mencionado, se trata de un sistema SBAS, concretamente de un servicio ofrecido por EGNOS. Esto implica que su funcionamiento es igual al de dichos sistemas de aumentación.

Se trata de funcionamiento conjunto con SBAS, sistema basado en aumentación por satélite. El usuario recibe la información de la aumentación de la constelación por medio de un satélite geoestacionario. El SBAS complementa a la constelación de satélites de GPS incrementando su precisión, continuidad y disponibilidad prevista dentro de un área de servicio.

Cuatro satélites geoestacionarios proporcionan datos corregidos al usuario, estos satélites, a diferencia de los de GPS, no tienen generadores de señal a bordo. Estos satélites geoestacionarios se encargan de retransmitir las señales corregidas en tierra por las estaciones RIMS. Estas estaciones miden las posiciones de cada satélite de EGNOS y comparan la precisión obtenida de la posición de cada satélite GPS con las medidas obtenidas de cada uno de los satélites.

Una vez corregido el error, las estaciones RIMS mandan las señales corregidas a las estaciones de control principal MCC, las cuales se encargan de enviar los datos corregidos a los satélites EGNOS por medio de estaciones en tierra llamadas NLES.

El servicio LPV-200 emplea el servicio SoL gratuito y abierto, diseñado para aplicaciones de transporte que presenten seguridad crítica, especialmente, para transporte aéreo. Este servicio proporciona soporte, principalmente, a las operaciones de aviación civil con LPV. Los satélites operativos se muestran a continuación:

Table 3 1 GEOs used by EGNOS

GEO Name	PRN Number	Orbital Slot
INMARSAT 4F2 EMEA	PRN 126	25.0 E
ASTRA SES-5	PRN 136	5 E
INMARSAT 3F2 AOR-E	PRN 120	15.5 W

Figura 7.1: Satélites GEO operativos usados por EGNOS en 2015

7.4.Implementación

En este apartado se hablará del estado actual de la implementación del servicio LPV-200 a nivel global.

En EE UU, el nivel de implantación de LPV-200 es total. Entre 2009 y 2013, WAAS se dedicó a la implantación de dicho servicio en el país. Tanto LPV-200 funcionando con WAAS, como LPV-200 funcionando con EGNOS, son interoperables, lo que facilita la navegación gracias al uso de un solo receptor SBAS a bordo de la aeronave.

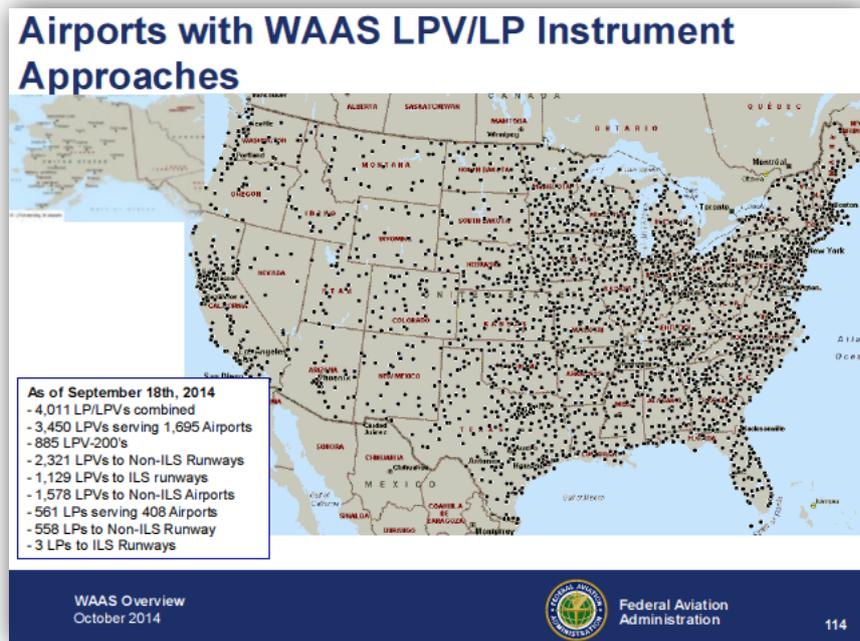


Figura 7.2: Aeropuertos operativos con LPV/LP en EE UU

La cobertura del sistema es total en el país, como se observa a continuación.

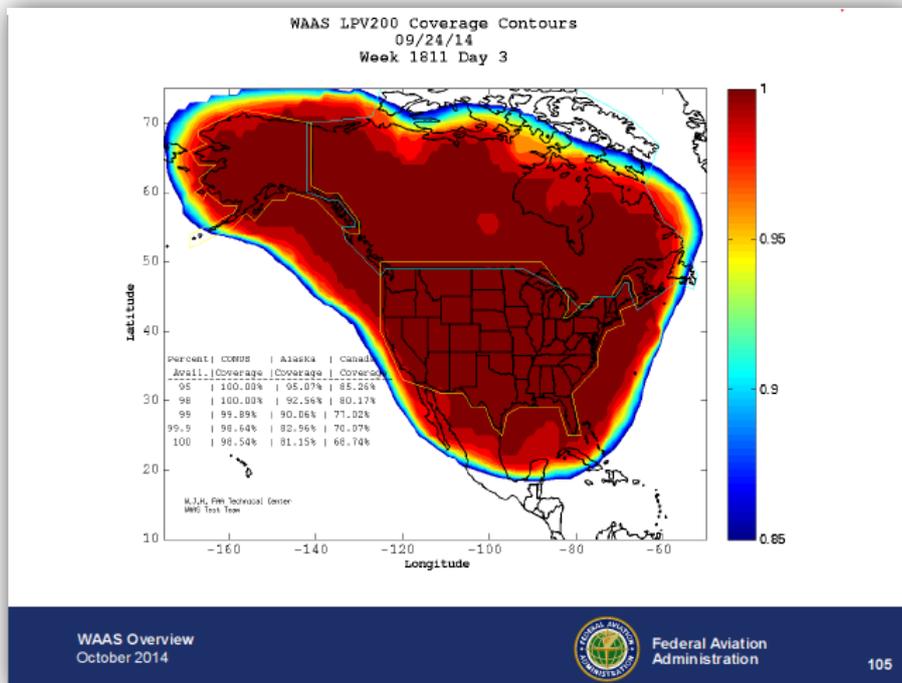


Figura 7.3: Cobertura LPV en EE UU

Por otro lado, es necesario equipar las aeronaves con receptores SBAS que permitan las operaciones LPV-200. Se espera, en un futuro cercano, implementar dicha práctica en diferentes aeronaves con receptores de diferentes fabricantes. En total, unas 74 572 aeronaves estarán equipadas con WAAS LPV.

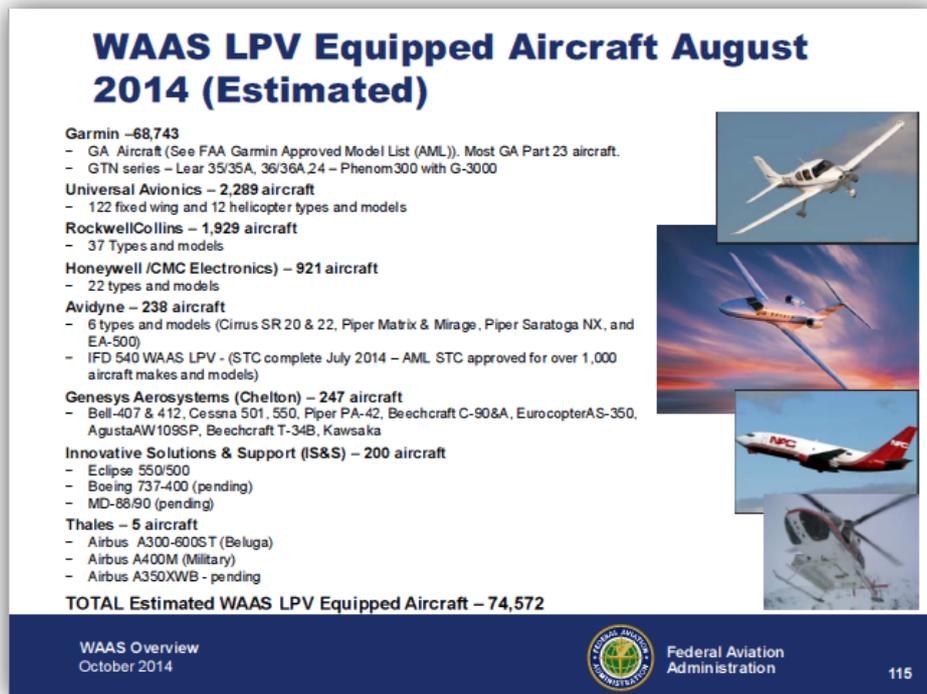


Figura 7.4: Aeronaves y receptores equipadas con LPV WAAS

Por su parte, la implementación en Europa se encuentra en fase de desarrollo y emplea, como ya se ha mencionado, el sistema EGNOS. El 3 de mayo de 2015, se implementaron las primeras aproximaciones LPV-200 en el aeropuerto Charles de Gaulle de París, los primeros de Europa. El sistema se declaró operativo en algunos aeropuertos europeos el 29 de septiembre del mismo año, presentando planes de implementación en la mayoría de aeropuertos europeos con un horizonte relativamente cercano. El siguiente aeropuerto programado fue el de Viena.

Se espera que para el tercer cuartil de este año, 2016, se haya implementado LPV-200 en la mayoría de aeropuertos europeos, dando por declarado en julio de este año el servicio. No obstante, según el congreso celebrado en Lisboa en el año 2014, no será hasta 2018 cuando se puedan encontrar más de 440 procedimientos EGNOS basados en LPV, incluyendo helipuertos en dichas operaciones.

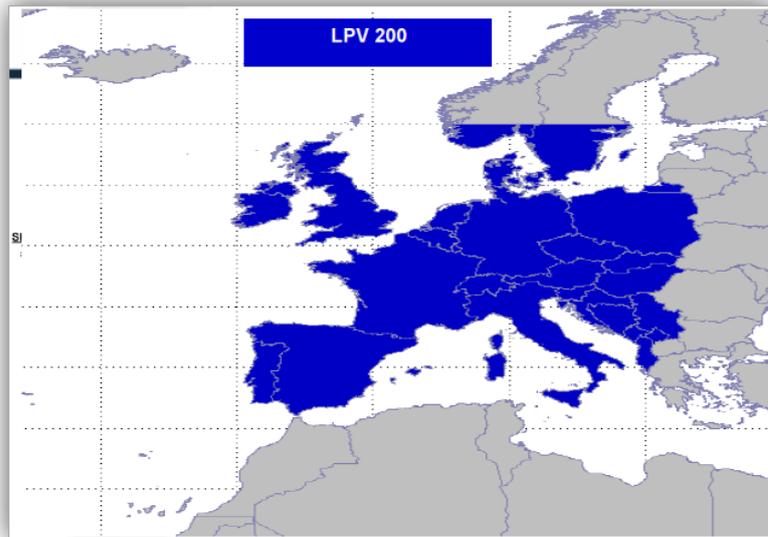


Figura 7.5: LPV-200 en Europa

En el congreso realizado en 2015, se anunció que el servicio estaría operativo en los aeropuertos en los que se hubiese implantado a partir del último cuartil del mismo año.

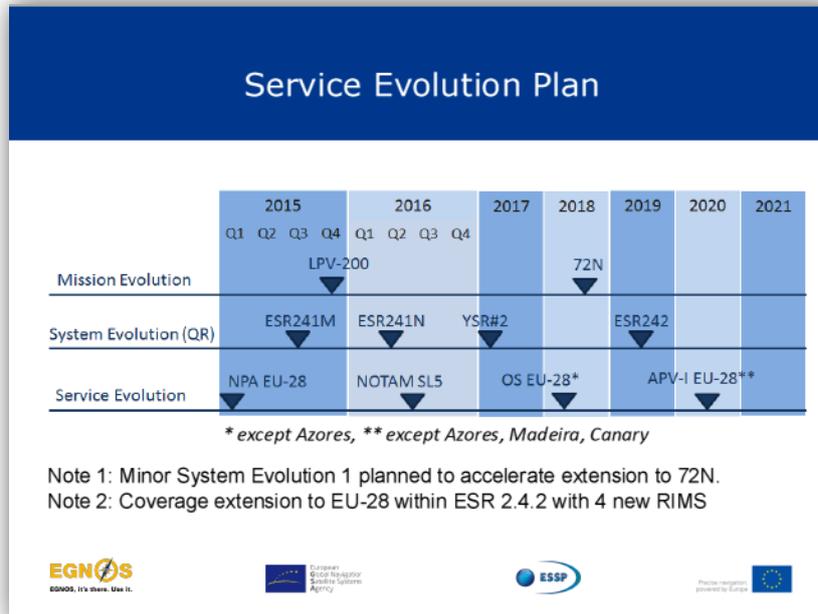


Figura 7.6: LPV-200 implantación

En 2014, las aerolíneas que ya trabajaban con LPV-200, eran 19, mostradas a continuación:



Figura 7.7: Operadores que trabajan con LPV-200 (2014)

Y las aerolíneas regionales europeas listas para implantarlo son:

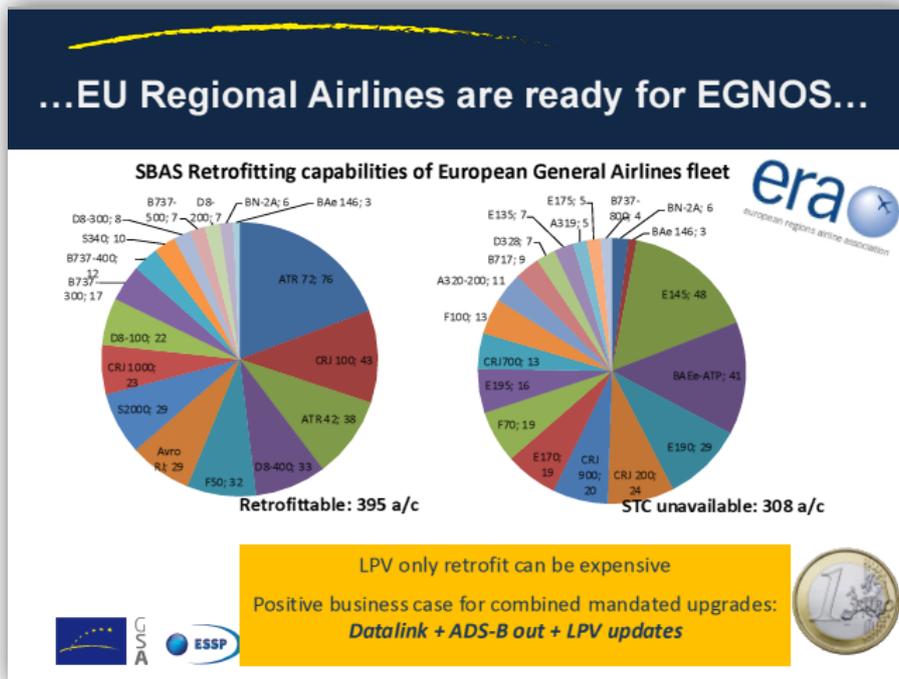


Figura 7.8: Aerolíneas regionales europeas listas para emplear EGNOS

En cuanto a la organización de aviación civil internacional (OACI), entre 2014 y 2015 planeó establecer la regulación LPV para pistas no instrumentales con aproximación de precisión equivalente a ILS CAT I. También se planeó implementar LPV-200 en 21 países europeos.

Algunos países que destacan por su interés en la implementación del sistema son Suiza, Francia y Reino Unido. Se esperaba para marzo de 2015 implementar operaciones de aproximación para helicópteros con RNP 0.3 en Suiza; en Francia para 2020 se espera declarar el servicio EGNOS V3 (CAT I) que incluye LPV-200, también para helicópteros; y, finalmente, en Exeter, se realiza el entrenamiento de pilotos, instructores y examinadores para las nuevas tecnologías LPV, clave para su implantación exitosa.

De esta manera, en 2015 se publicó que LPV-200 estaría operativo en 130 aeropuertos de 18 países distintos, contando con 202 procesos basados en EGNOS, así como en 10 nuevos operadores regionales/negocios/emergencias. La implementación anunciada también se extenderá al campo de aeronaves de ala rotatoria, eliminando así las limitaciones en los procedimientos que, hasta ahora, han sido idénticos a los empleados por aviones.

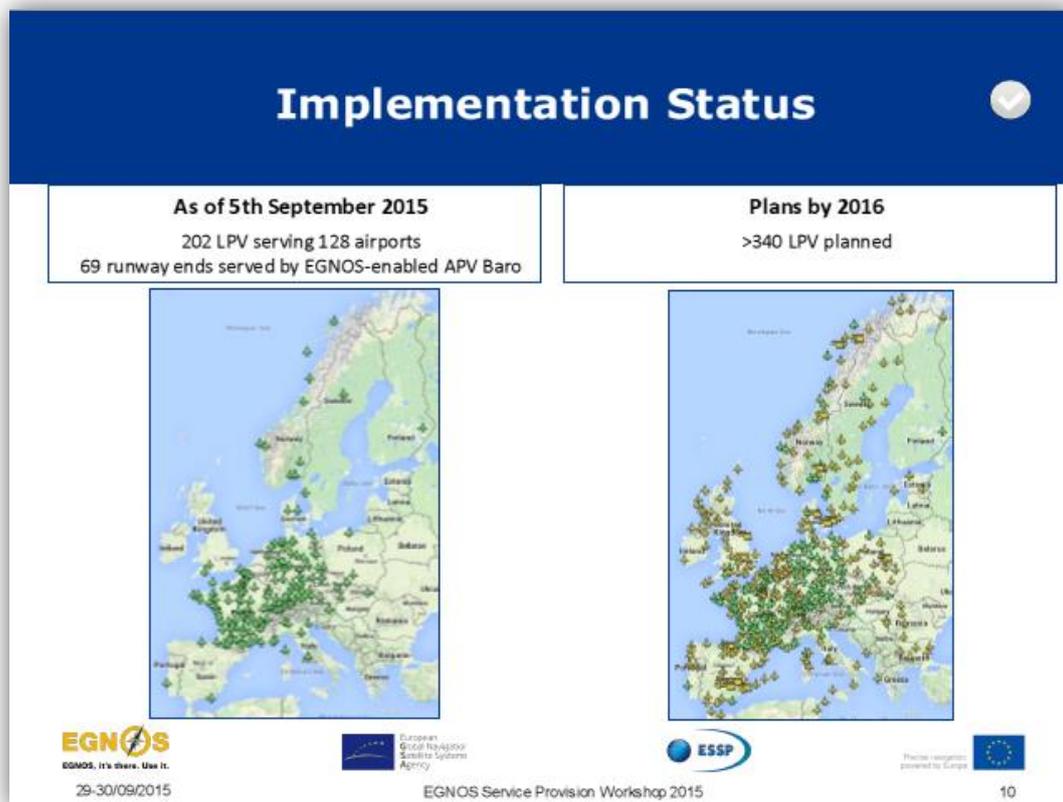


Figura 7.9: Estado presente y futuro de la implantación LPV-200

En resumen, la implantación de LPV-200 es cada vez mayor, encontrándose aún en fase de desarrollo en el continente europeo. Los nuevos procedimientos abarcan tanto aviones como aeronaves de ala rotatoria, siendo imprescindible la movilización de aerolíneas, aeronaves y aeropuertos, así como la formación de pilotos, instructores y examinadores. Airbus incluye EGNOS en aeronaves como el A-350 Xwb, facilitando así el proceso. La interoperabilidad es clave para el exitoso funcionamiento de los procedimientos y es posible empleando un único receptor genérico que funcione para los diferentes SBAS ya explicados anteriormente. España es uno de los países con un gran número de aeropuertos planificados para emplear dicho procedimiento. La regulación de dichos sistemas, estableciendo unos requisitos a cumplir para considerarse certificable, así como de la supervisión de los mismos, EASA. OACI presenta la documentación de regulación del sistema en documentos como el PANS OPS 8168 y el Anexo 10.

Finalmente, cabe mencionar que se prevé la implantación del sistema EGNOS también en el continente africano, corriendo ésta a cargo de ASECNA.

7.5.Implementación en España

En cuanto a la implementación en España, el proceso tiene un desarrollo lento. Actualmente, existe un único aeropuerto español habilitado para realizar aproximaciones mediante LPV desde el año 2013: Santander (LEXJ). La aerolínea que operará con este tipo de aproximaciones es la española Air Nostrum. No obstante, desde el año 2015 en la pista 25 del aeropuerto de Almería, las operaciones LPV con la aerolínea Air Nostrum también son posibles. Desde el 31 de marzo de 2016 también están presentes en la pista 07.

Se espera conseguir la implementación del servicio en la mayoría de helipuertos y aeropuertos españoles, encontrándose las fechas previstas entre 2016 y 2020. Sin embargo, hay algunos de ellos cuya fecha no está definida. Según los datos publicados por EGNOS, el proceso debería completarse en 2020, pero este horizonte se difumina por la presencia de los ya mencionados aeropuertos sin fecha establecida.

El helipuerto de Albacete es uno de los que no presenta fecha fija de implantación completa. Por su parte, el aeropuerto de Valencia espera ver completado el proceso en octubre de 2017.

Las aerolíneas que operarán en los aeropuertos con aproximaciones LPV son las españolas Air Nostrum, que ya se encuentra operativa en el aeropuerto de Santander e Inaer (servicio de emergencias y mantenimiento de aeronaves); la francesa HOP!; la letona Air Baltic; Qatar Airways; Ethiopian Airways; la flota europea Airbus Transport International y Etihad Airways, segunda aerolínea de los Emiratos Árabes Unidos. En cuanto a las compañías que operarán en helipuertos, se encuentran las españolas Helicsa e Inaer y el helicóptero médico Osakidetza.

En resumen, el proceso de implantación de LPV-200 en los aeropuertos españoles sigue un desarrollo lento con sucesivos retrasos en la consecución del plan establecido debido a la dificultad en la certificación y validación de los procedimientos. No obstante, se prevé establecer el sistema en el horizonte de 2020, facilitando así las operaciones y reduciendo el coste de infraestructura y mantenimiento. De esta manera, España forma parte del plan europeo de implantación de EGNOS.

8. Requerimientos

Las prestaciones y calidad de un sistema GNSS vienen dadas por los valores obtenidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, comparándolos con los valores RNP (Required Navigation Performance) establecidos por la OACI y demás organismos reguladores, como EASA, para las diferentes fases de vuelo.

Para el caso de este Trabajo Final de Grado, concretamente, se realiza el estudio de una aproximación con guiado 3D, LPV-200, para la que la OACI establece los requerimientos mostrados a continuación:

EGNOS SoL Service Level: LPV-200										
CURRENT EGNOS SERVICE LEVELS	ICAO ANNEX 10 Vol I – SIS PERFORMANCE REQUIREMENTS								ICAO PBN Manual (NAV SPEC)	
	ACCURACY		INTEGRITY			CONTINUITY	AVAILABILITY			
	HNSE (95%)	VNSE (95%)	Integrity	Time To Alert	Horizontal Alert Limit					Vertical Alert Limit
NPA	En-route (oceanic/cont low density)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	7.4 km (4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999	RNAV 10* RNP 4* (*non sbas receivers) RNP 2
	En-route, continental					3.7 km (2 NM)	N/A			RNAV 5, 2, 1 RNP 0,3
	En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	1.85 km (1 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999	RNP 1
	Initial/Intermediate App / NPA / Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	3.7 km (2 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-5}/h$	0.99 to 0.99999	RNAV 1 RNP 0,3
APV-1	APV-1	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999	RNP APCH down to LPV (DH >250')
Category I precision approach	Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 to 4.0 m (52 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	40 m (130 ft)	35.0 to 10.0 m (115 - 33 ft)	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999	RNP APCH down to LPV (DH >200')

Figura 8.1: Requisitos LPV-200

Se explican a continuación los requerimientos y sus magnitudes correspondientes.

8.1. Precisión

La primera característica a evaluar para la certificación de un sistema es la precisión. Se suele definir como la diferencia entre la posición estimada y la posición real, y se expresa de forma estadística como un determinado percentil en la distribución de errores. En el caso de la navegación aérea, se suele utilizar el percentil 95, lo que implica que el 95% de las medidas tendrán un error menor o igual al valor de precisión. No obstante, también se suele dar el percentil 99 y el 50, además de la media y la desviación, tanto para el error horizontal (HNSE: Horizontal Navigation System Error) como para el vertical (VNSE: Vertical Navigation System Error).

La OACI establece unos requerimientos de precisión para las aproximaciones LPV-200 de 16 m en horizontal y de entre 4 y 6 m en vertical, requerimientos que EGNOS cumple de sobra al tener en torno a 1 metro de error en el posicionamiento horizontal y de 2.1-2.5 metros en el vertical. Aquí es posible observar la diferencia con APV-I ya mencionada anteriormente, ya que la precisión vertical es de 20 m, mucho mayor que la del sistema LPV-200.

Table 6 4 LPV-200 accuracy

	Definition	Value	APV-I requirement
Horizontal	Corresponds to a 95% confidence bound of the 2-dimensional position error ¹⁸ in the horizontal local plane for the Worst User Location ¹⁹	3m	16m
Vertical	Corresponds to a 95% confidence bound of the 1-dimensional unsigned position error in the local vertical axis for the Worst User Location	4m	6m to 4m

17. Annex 10 of the Chicago Convention, Attachment D, 3.4.3.4: "For those areas where the system design does not meet the average continuity risk specified in the SARPs, it is still possible to publish procedures. However, specific operational mitigations should be put in place to cope with the reduced continuity expected. For example, flight planning may not be authorised based on GNSS navigation means with such a high average continuity risk".

18. As for the case of range errors, the horizontal and vertical positioning accuracies correspond to a composition of residual errors from different sources (EGNOS ground and space segments, local environment and user segment). The assumptions taken on residual error sources beyond the control of EGNOS (e.g. tropospheric effects, receiver noise and multipath) are similar to the ones described in section 4.3.

19. The definition of Worst User Location can be found in Appendix C

Figura 8.2: Precisión LPV-200 (2015)

8.2. Integridad

La integridad se define como medida de la confianza depositada en la validez de la información proporcionada por el sistema o, lo que es lo mismo, la probabilidad de que el servicio de navegación tenga la precisión especificada y de que, en caso de que la información proporcionada al usuario no sea utilizable, éste disponga de avisos. Es importante definir algunos términos antes de entrar en detalle.

- Alert Limit (AL): Límite de alerta. Es la tolerancia al error que no debe ser superada sin emitir un mensaje de alerta al usuario.
- Time to Alert (TAL): Tiempo de alerta. Es el máximo tiempo que puede pasar desde que el sistema de navegación se encuentre fuera de los valores de tolerancia hasta que el equipamiento envía la alarma.
- Integrity Risk (IR): Riesgo de integridad. Se define como la probabilidad de que en un momento determinado el error de posición sea superior al límite de alerta.
- Protection Level (PL): Nivel de protección. Se trata de un error estadístico que asegura que la probabilidad de que el error de posición absoluto sea mayor que ese número sea menor o igual que el riesgo de integridad.

Existen dos tipos de herramientas para medir la integridad y representarla gráficamente: los índices de seguridad y los diagramas Stanford.

El índice de seguridad es la relación entre el error del sistema de navegación y el nivel de protección. Este cociente debe ser siempre menor que 1 para que la operación sea segura. En EGNOS el índice de seguridad es prácticamente siempre menor al 0.5.

Un diagrama Stanford es un gráfico en el que el error de posición está situado en el eje x y el nivel de protección en el eje y, dividido en regiones por la diagonal que representa cuando estos dos valores son iguales y por los niveles de alerta, ya sea horizontal o vertical. Reporta eventos de integridad y permite distinguir entre dos tipos: información engañosa (MI) e información altamente engañosa (HMI).

- MI: Ocurre cuando, habiendo sido declarado disponible, el sistema presenta un error de posición que excede el nivel de protección pero no el de alerta.
- HMI: Ocurre cuando, habiendo sido declarado disponible, el sistema presenta un error de posición que supera los niveles de alerta.

Hay diagramas de alerta tanto para la componente vertical como para la horizontal del error de posición. El eje diagonal separa las muestras en las cuales el error de posición es cubierto por el nivel de protección (sobre la diagonal) de aquellas en las que el error de posición excede dicho nivel (debajo de la diagonal). Los diagramas de Stanford permiten una comprobación rápida y fácil de la integridad, asegurando que todos los puntos muestreados permanezcan en la parte superior de la diagonal. Además, la proximidad de la nube de puntos a la diagonal, da una idea del nivel de seguridad, ya que la cercanía a la misma implica que un fallo de integridad va a suceder pronto.

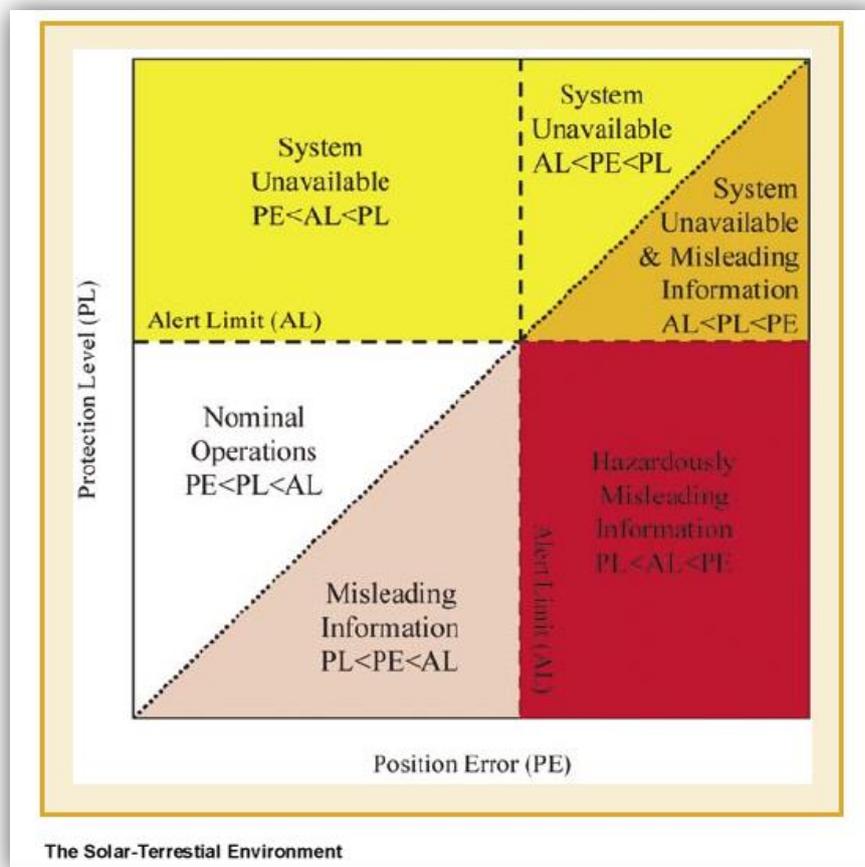


Figura 8.3: Diagrama de Stanford

Como ya se ha dicho, la diagonal de puntos discontinua representa el conjunto de puntos en los que el error de posición sería igual al nivel de protección.

En la zona superior, en la que el nivel de protección será siempre mayor que el error, existen dos zonas: la zona de operaciones normal en la que el nivel de protección además de ser mayor al error de posición es menor que el límite de alerta, siendo por tanto la zona

óptima para las operaciones; y la zona de servicio no disponible, en la que el nivel de protección es mayor que el nivel de alerta, por lo que no se puede garantizar que se pueda realizar la operación y el sistema se encuentra no disponible.

Como ya se ha explicado anteriormente, en la zona inferior de la diagonal se encuentra la región en la que el error de posición será siempre mayor que el nivel de protección, lo que implica que el sistema carece de integridad. Se pueden distinguir dos zonas distintas en esta región: la zona de información engañosa (MI) en la que el error de posición es mayor que el de protección, pero menor que el límite de alerta, lo que hace que la operación sea peligrosa; y la segunda zona de información altamente engañosa (HMI), ya que, además de lo anterior, en este caso el error sí es mayor que el límite de alerta.

8.3.Continuidad

Se define la continuidad de un sistema como la probabilidad de que el funcionamiento del sistema especificado se mantenga a lo largo de la duración de una fase de una operación determinada.

De este modo, en navegación aérea, se tiende a medir la continuidad como la probabilidad de que la capacidad operativa del sistema se mantenga sin interrupciones programadas durante un período de tiempo dado. Este período puede ser de quince segundos o de una hora, es decir, la probabilidad de que la continuidad se mantenga durante dicho periodo de tiempo expresado en percentil. Para aproximaciones de no precisión, se emplea el período de tiempo de una hora, ya que se trata de operaciones con menor nivel de criticidad. En cuanto a las aproximaciones de precisión, como las realizadas con LPV-200, se emplea el período de 15 segundos.

Además, es posible encontrar diversos tipos de errores de continuidad:

- **Fallos graves (Hard Failures):** Fallos que resultan en el cese de la emisión de la señal GNSS. Puede tratarse de cese repentino o de cese gradual. Éstos se dividen, a su vez, en dos grupos.
 - Fallos a largo plazo (LT): Son aquellos que resultan en una pérdida de la señal de forma irreparable. La solución suele ser reemplazar el satélite que lo ha generado mediante el lanzamiento de uno nuevo.

- Fallos a corto plazo (ST): Son aquellos que resultan en una pérdida temporal de la señal, cuya solución es cambiar el satélite del que se recibe el mensaje mediante un sistema redundante en lugar del fallido.
- **Fallos por desgaste:** Se distinguen de los anteriores porque son, usualmente, predecibles. Son característicos de satélites que se encuentran en la fase operativa end-of-life (EOL), no de satélites lanzados recientemente o de “edad media”. Se trata de fallos LT.
- **Fallos leves:** Se trata de fallos de integridad, es decir, que el sistema continúe funcionando sin alerta de fallo de integridad. El Segmento de Control alerta de este tipo de errores tan pronto como sea posible tras la ocurrencia del evento.

La continuidad es el requerimiento en el que EGNOS obtiene peores resultados, sin llegar a los mínimos exigidos por la OACI para operaciones LPV-200 (10^{-4}). Sin embargo, la misma OACI permite que se use un sistema de navegación que no cumpla del todo con este requisito si se toman medidas para compensar esa falta en los requerimientos.

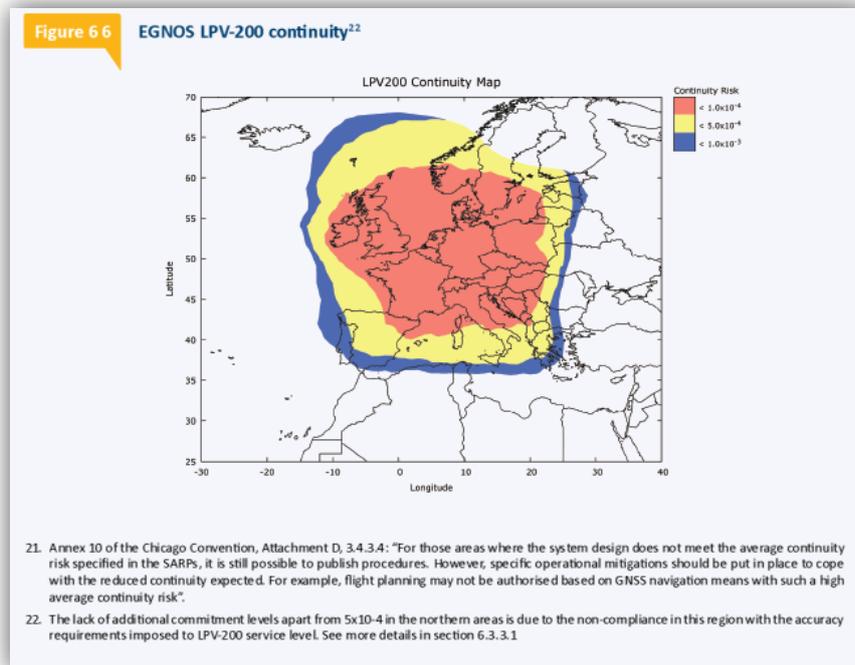


Figura 8.4: Continuidad LPV-200 Workshop 2015

8.4. Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema es el porcentaje de tiempo en el que los servicios del sistema son utilizables para la navegación. Es una indicación de la capacidad del sistema para proveer un servicio utilizable dentro del área de cobertura. La disponibilidad de la señal es el porcentaje de tiempo en que las señales de navegación transmitidas desde fuentes externas, están disponibles para su uso. Es función tanto de las características físicas del entorno, como de las capacidades técnicas de las facilidades de transmisión.

Como ya se ha mencionado, se mide usualmente en forma de porcentaje que expresa el tiempo que el sistema es utilizable por un usuario, receptor o aplicación.

Se pueden realizar particularizaciones del concepto de disponibilidad considerando la disponibilidad de una señal utilizable proveniente de un satélite específico o bien, considerando la disponibilidad de posición, velocidad y tiempo de la constelación completa.

El primero de los casos se corresponde con el correcto funcionamiento del comportamiento del satélite. Sólo garantiza que el pseudorange del satélite sea conocido. Para el segundo caso, se requiere la posibilidad de realizar un bloqueo en la señal de, al menos, 3 satélites (posicionamiento 2D más tiempo).

Cuando se considera la disponibilidad de tiempo, velocidad y posición, se pueden realizar restricciones adicionales para definir cuándo se encontrará disponible el sistema. Si una aplicación específica requiere que la disponibilidad sea utilizable sólo en caso de obtener un error por debajo de un determinado umbral, se puede afirmar que dicha aplicación está disponible sólo si se alcanza dicho requerimiento. Esta aproximación sólo se puede realizar en caso de que el sistema proporcione la integridad adecuada o en caso de existir un sistema de referencia para medir errores.

Factores como la visibilidad de la constelación y su configuración son clave para definir la disponibilidad de una aplicación.

EGNOS cumple con los requisitos de disponibilidad que establece la OACI, siendo el porcentaje de tiempo en que está disponible la señal SBAS mayor del 99% en prácticamente toda Europa.

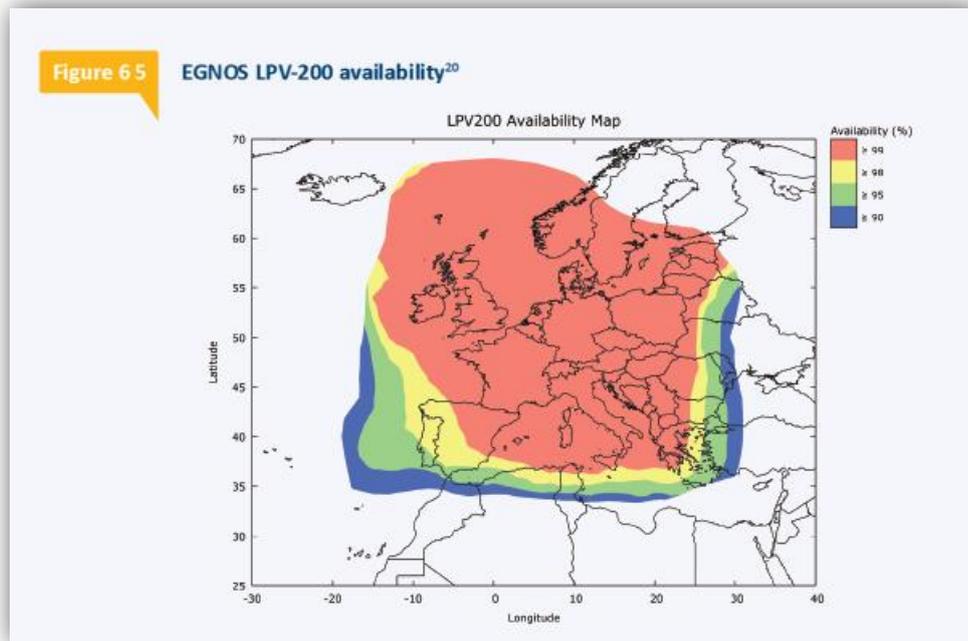


Figura 8.5: Disponibilidad LPV-200 Workshop 2015

9. Validación de procedimientos PBN

La validación de procedimientos de navegación basada en requerimientos (PBN) se puede adquirir si se sigue un proceso de acuerdo a lo dictado por la OACI. Con este objetivo, se debe hacer un proceso que consta de tres etapas: una campaña de toma de datos a largo plazo, una campaña sobre el terreno y un ensayo de vuelo.

9.1. Campaña de toma de datos a largo plazo

La primera de las etapas a realizar para la certificación de un procedimiento PBN por la OACI, es la campaña de toma de datos a largo plazo. Ésta se realiza durante seis meses para comprobar que los valores de las prestaciones de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad GNSS/SBAS cumplen con los requerimientos.

Para la realización de dicha campaña, se han obtenido los datos necesarios de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad de la página web de ESSP (European Satellite Services Provider), proveedor de servicio de EGNOS y que en sus informes mensuales incluye estadísticas de los resultados de rendimiento.

Se ha hecho el análisis durante los 6 meses requeridos, desde noviembre de 2015 hasta abril de 2016, para el área de Albacete. Los resultados se presentan tal y como corresponde según lo explicado en el apartado 8.

9.1.1. Precisión

En el caso estudiado, la precisión se expresa como el percentil 95 de los errores de navegación tanto horizontal como vertical. Como ya se ha visto anteriormente, el error exigido en operaciones LPV-200, equivalente a aproximación de precisión de categoría I, es, en el caso horizontal, de menos de 16 metros y, en el vertical, de entre 6 y 4 metros.

Para analizar los resultados obtenidos, se escoge el valor más alto de los obtenidos en todas las estaciones RIMS, ya que no existe una estación establecida en Albacete. De este modo:

	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16
HNSE (m)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
VNSE (m)	2.1	2.1	2	2.2	2.4	2.5

Figura 9.1: Errores de precisión LPV-200

Como se puede observar en la tabla anterior, los errores de posición se encuentran por debajo de los límites establecidos, por lo que se cumplen los requisitos de precisión.

9.1.2. Integridad

En cuanto a la integridad, es necesario analizar los índices de seguridad, tanto en vertical como en horizontal, para estudiar si se cumplen los requisitos establecidos. Como ya se expuso en el punto 8, el valor no debe sobrepasar es de 1.

Los resultados obtenidos son:

	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16
HSI (m)	0.36	0.31	0.25	0.25	0.39	0.46
VSI (m)	0.31	0.36	0.32	0.35	0.33	0.4

Figura 9.2: Índice de seguridad vertical y horizontal

Se puede observar que en ninguno de los casos se sobrepasa el valor de 1, con lo que se cumplen los requisitos de integridad respecto al índice de seguridad.

9.1.3. Continuidad

Para analizar la continuidad del sistema, se estudia el cociente entre el número de eventos de continuidad en un tiempo de 15 s, es decir, los fallos de continuidad, y el número de muestras totales.

Los resultados obtenidos para los satélites operativos, que son el 120 y el 136, se muestran a continuación.

	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16
Continuidad (1/15 s)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Figura 9.3: Continuidad para el sistema LPV-200

En el caso de la continuidad, debe encontrarse entre 1 y $8 \cdot 10^{-6}$. Como se puede observar, los resultados no cumplen los requisitos establecidos. No obstante, sería posible su uso para navegación aérea siempre que se mitigue dicho fallo en condiciones que lo permitan.

9.1.4. Disponibilidad

Finalmente, queda por analizar la disponibilidad del sistema LPV-200. Existen dos maneras diferentes para hacerlo: como porcentaje de tiempo en el que la señal en el espacio (SIS: Signal in Space) está disponible, o respecto del tiempo total.

Los resultados obtenidos para los satélites activos con PRN 120 y 136 son:

	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16
PRN 120 y 136	99.77%	99.94%	99.88%	99.75%	99.95%	99.90%
PRN 120 o 136	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PRN 120	99.77%	99.96%	99.94%	99.81%	99.99%	99.93%
PRN136	99.99%	99.98%	99.96%	99.94%	99.96%	99.97%

Figura 9.4: Disponibilidad SIS para los satélites activos

Es fácilmente observable que se cumplen los requisitos de disponibilidad establecidos por la OACI, habiendo disponible siempre uno de los dos satélites.

La segunda manera de medir la disponibilidad del sistema es tomando el porcentaje de tiempo en el que la señal cumple los requisitos para operaciones LPV-200, es decir, que los niveles de protección horizontal y vertical sean los establecidos. De este modo:

	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16
HPL < 40 m y VPL 10-35 m	>99.9%	>99.9%	>99.9%	>99.9%	>99.9%	>99.9%

Figura 9.5: Disponibilidad LPV-200

Se observa, nuevamente, que se cumplen los requisitos de disponibilidad establecidos.

9.2.Campaña sobre el terreno

A continuación, en la consecución del proceso de certificación, se realiza la campaña sobre el terreno. Ésta deber realizarse en el mismo lugar en el que se pretenden llevar a cabo las operaciones PBN (Albacete en este caso) y deben tener una duración de 36 horas como mínimo. Se toman datos desde distintas posiciones alrededor del helipuerto y junto a la pista de aterrizaje. En este caso, la toma de datos se realiza durante 5 días. Los resultados obtenidos para dicha campaña se muestran en el apartado 12 y se han alcanzado a través de la simulación y análisis mediante PEGASUS.

9.3.Ensayo de vuelo

La etapa final del proceso de certificación es la campaña sobre el terreno, es decir, un ensayo de vuelo. Esta etapa se realiza sólo en caso de haber obtenido resultados satisfactorios en las dos etapas anteriores. Con ella se comprueba que todo funcione correctamente y que no se produzcan problemas inesperados durante el aterrizaje.

10. Formato, obtención y manipulación de datos

Para empezar, se realizará una breve descripción de los formatos y protocolos de transmisión de datos existentes en el campo de los sistemas de navegación por satélite.

A la hora de escoger el formato de trabajo, se debe tener en cuenta, principalmente, el tipo de receptor GNSS que se tiene disponible y los formatos admitidos por el software a utilizar. Se hará especial hincapié en el formato RINEX, ya que es el formato en el cual se encuentran los datos empleados en la realización de este TFG.

Posteriormente, se describirá el proceso realizado para la obtención y manipulación de los datos necesarios para la campaña sobre el terreno, realizando la simulación con el software explicada en el siguiente apartado.

10.1. Formato RTCM

El formato RTCM (Radio Technical Commission for Maritim Services), es el conjunto de recomendaciones para la transmisión de correcciones diferenciales a los usuarios del sistema GPS.

Se usó por primera vez en el año 1985 y se han ido realizando ligeras modificaciones en las versiones sucesivas de dicho formato. La más extendida es la 2.1.

El formato de datos RTCM para la transmisión de correcciones diferenciales GPS, se ha constituido como un estándar para todos los receptores GPS. Así, todos aquellos que puedan trabajar en modo diferencial, aceptan las correcciones diferenciales en este formato.

10.2. NTRIP

Cuyas siglas significan Network Transport of RTCM via Internet Protocol, constituye el protocolo de transmisión de datos a través de Internet. Envía a través de la telefonía móvil los datos encapsulados de las correcciones diferenciales.

10.3. RTCA

El formato RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) se creó para enviar las correcciones de los sistemas locales con requerimientos de tiempo real. Se emplea, principalmente, en aviación.

Presenta peculiaridades como la complejidad de procesamiento de los mensajes, siguiendo las recomendaciones dadas por la RTCA.

10.4. Formato NMEA

El formato NMEA (National Marine Electronics Association) es un estándar utilizado para evitar incompatibilidades, como el ritmo de los datos y el formato de los mensajes entre dispositivos marítimos electrónicos. Se emplea, principalmente, para transmitir datos entre un receptor GPS/GNSS y otros dispositivos.

10.5. Formato RINEX

El formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) fue creado a finales de la década de los 80. Su objetivo era el de presentar e intercambiar los datos recibidos de diferentes tipos de receptores GPS de forma sencilla. Los archivos RINEX están escritos en formato ASCII, lo que garantiza su lectura por cualquier tipo de software.

En sus inicios, este formato se desarrolló para funcionar, exclusivamente, con datos del sistema americano GPS. No obstante, se ha ido adaptando para soportar también los datos del sistema ruso GLONASS o, ya recientemente, del sistema europeo Galileo, sin la necesidad de cambiar la estructura del formato.

Existen diferentes versiones del formato RINEX. La primera, fue denominada RINEX Version 1 y fue presentada en 1989. Permitía el intercambio de datos GPS entre diferentes receptores. Esta versión se mejoró al aparecer RINEX Version 2 en 1990, que añadió la

posibilidad de recibir datos de otros sistemas de satélites como GLONASS o los geoestacionarios SBAS.

La versión empleada en este proyecto es la 2.10, modificación de la RINEX Version 2. Esta modificación permite, entre otros pequeños cambios, nuevos observables o la posibilidad de recibir datos a frecuencias que no sean números enteros.

El formato RINEX presenta actualmente cuatro ficheros:

- Fichero de observación
- Fichero de navegación GPS
- Fichero de datos meteorológicos
- Fichero de navegación GLONASS

De estos cuatro ficheros, se emplearán, únicamente, el fichero de observación y el fichero de navegación GPS, junto con el fichero SBAS. Todos ellos proporcionarán la información necesaria para la simulación.

La nomenclatura recomendada para todos los archivos RINEX es la siguiente:

ssssddf.yyt

Dónde:

- t: tipo de archivo, pudiendo ser:
 - O: archivo de observación
 - N: archivo de mensaje de navegación GPS
 - M: archivo de datos meteorológicos
 - G: archivo de mensaje de navegación GLONASS
 - L: archivo de mensaje de navegación Galileo
 - P: archivo de mensaje de navegación mixto
 - H: archivo de mensaje de navegación de carga útil SBAS
 - B: archivo de emisión de datos SBAS
 - C: archivo de reloj
 - S: archivo de resumen
- yy: los dos últimos dígitos del año correspondiente a la observación (1999: 99, 2015: 15).

- f: secuencia de caracteres del día. Letra que indica en los ficheros horarios la hora de los datos recibidos.
 - a: primera hora: 00h-01h
 - b: segunda hora: 01h-02h
 -
 - x: vigesimocuarta hora: 23h-24h
- ddd: día del año de la primera observación.
 - 001: 1 de enero
 - 152: 1 de junio
 - 365: 31 de diciembre
- ssss: 4 caracteres que designan el nombre de la estación. Para la estación situada en Albacete el código es ALBA.

10.5.1. Ficheros de observación

Está dividido en dos secciones: la sección de cabecera y la sección de los datos. La estructura de la cabecera es igual para todos los ficheros y contiene la información obligatoria sobre la versión RINEX y el sistema de navegación utilizado, el nombre de la institución que crea el archivo o la empresa fabricante de la antena receptora, por ejemplo.

En cada fichero se pueden encontrar los datos de una estación en una determinada sesión. Además, es posible concatenar varios de estos ficheros para obtener información procedente de varias estaciones o épocas o ambas.

Hay tres medidas fundamentales en los observables de GPS que son tiempo, pseudodistancia y fase:

- **Tiempo:** el tiempo de la medida es el tiempo del receptor de las señales recibidas. Es idéntico para las medidas de pseudodistancia y fase y para todos los satélites observados en una época determinada. Cuando hay observaciones de un único sistema GNSS en el fichero, el tiempo se expresa en el tiempo de dicho sistema por defecto. Pero, para observaciones de distintos sistemas de satélites, se indica el tiempo al comienzo del encabezado.

- **Pseudodistancia:** Es la distancia desde la antena receptora hasta la antena del satélite incluyendo los offsets del reloj del receptor y de la antena, entre otros factores. Hay varios tipos de pseudodistancias de acuerdo con el código y la frecuencia: la C1 (código C/A) sobre frecuencia L1, la P1 (código P sobre L1) y la P2 (código P sobre L2). Algunas de ellas pueden no recogerse dependiendo del receptor. Esto se debe a que el código P es de uso militar y está encriptado.
- **Fase:** Se mide en ciclos completos de portadora-fase sobre las frecuencias L1 o L2, y se llama de forma análoga. No es recomendable, debido a posibles ambigüedades, pero ciertos receptores pueden medirla en medios ciclos.

También se puede emplear en observaciones Doppler para receptores que dispongan de la lectura de observables D1 y D2.

La estructura del fichero de observación es la siguiente:

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION / TYPE	- Versión de RINEX Tipo de fichero ("O" observ.) Sistema de satélite: 1. G: GPS 2. R: GLONASS 3. T: NNSS Transit. 4. M: Mixto
PGM / RUM BY / DATE	- Programa de creación del fichero o Agencia de la creación del fichero o Día de creación del fichero
COMMENT	- Comentarios
MARKER NAME	- Nombre del punto de observación
MARKER NUMBER	- Número del punto de observación
OBSERVER / AGENCY	- Nombre del observador y agencia
REC # / TYPE / VERS	- Número del receptor, tipo y software
ANT # / TYPE	- Número y tipo de antena
APROX POSITION XYZ	- Posición absoluta aproximada del punto en la última época.
ANTENNA: DELTA H/E/N	- Altura de antena y excentricidades relativas al este y al norte (m).
WAVELENGTH FACT L1/2	- Factores de (λ ?) para L1 y L2: o 1: Ciclo completo o 2: Medio ciclo (cuadratura) o 0 en L2: Sólo una frecuencia. - Número de satélites con estos factores. - Lista de PRNs satélites
# / TYPES OF OBSERV	- Número de observables grabados. - Tipos de observables grabados. o L1, L2: Medidas de fase L1 o L2. o C1: Pseudodist. Con C/A en L1. o P1, P2: Ídem con P en L1 o L2.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ D1, D2: Doppler en L1 o L2. ○ T1,T2: Transit Integrated Doppler en 150 o 400 MHz - Las unidades de las medidas son: <ul style="list-style-type: none"> ○ Fase de ciclos enteros. ○ Pseudodistancia: metros. ○ Doppler: Hz. ○ Transit: ciclos.
INTERVAL	- Intervalo de observación (épocas) en s.
TIME OF FIRST OBS	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de la primera época de grabación (año, mes, día, hora, minuto y segundo) - Sistema de tiempo: <ul style="list-style-type: none"> ○ GPS: tiempo GPS. ○ GLO: tiempo UTC.
TIME OF LAST OBS	- Tiempo de la última época de grabación. La estructura es análoga a la anterior.
LEAP SECONDS	Salto de segundos desde el 6 1 1980. Es recomendable su uso con datos mixtos.
END OF HEADER	- Final de cabecera
OBS RECORD	<ul style="list-style-type: none"> - Época (año, mes, día, min, seg). - Señal 0 (OK) ó 1 (falta de sincronismo entre la época anterior y la actual). - Número de satélites en la época actual. - Lista de PRNs en la época actual. - Valores de las observables. - Desfase del reloj del receptor.

Figura 10.1: Fichero de observación RINEX

Un ejemplo de un fichero de observación RINEX para este proyecto es el mostrado a continuación, ALBA122A.16d.

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2011oct11 IGN-E (SPG) 20160501 01:01:14UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|+= COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
ALBA MARKER NAME
13452M001 MARKER NUMBER
Programas Geodesicos Instituto Geografico Nacional OBSERVER / AGENCY
1700062 LEICA GR10 3.03/6.214 REC # / TYPE / VERS
10240005 LEIAR25.R3 LEIT ANT # / TYPE
4962848.2063 -160854.3648 3990884.2090 APPROX POSITION XYZ
3.0590 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
8 L1 L2 L5 C1 C2 P2 S1 S2 # / TYPES OF OBSERV
1.0000 INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 1 seconds COMMENT
DefaultJobName COMMENT
DefaultUserDiscription COMMENT
Project creator: COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
2016 5 1 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
15 LEAP SECONDS
END OF HEADER
16 5 1 0 0 0.0000000 0 24G28G17G14G03G23G01G11G08G22G32G27R05
R22R04R07R19R21R06R20E19E09E18E12E11
122507564.793 7 95460434.84746 23312406.400
23312402.220 47.700 39.700
130858106.275 7 101967355.107 6 24901464.940 24901462.680
24901462.120 42.800 40.950
122576463.071 7 95514147.27346 23325510.420
23325506.160 47.100 39.100
111871442.355 8 87172579.603 8 83540389.690 8 21288415.220 21288414.080
21288413.400 50.100 48.750
132596708.934 7 103322088.86445 25232318.380
25232313.260 46.600 33.950
107957196.629 8 84122521.061 8 80617432.345 8 20543543.860 20543542.440
20543542.360 50.550 49.700
105454554.820 8 82172415.76347 20067310.340
20067305.180 48.450 47.500
113251173.715 8 88247720.129 8 84570734.571 8 21550964.400 21550964.440
21550963.600 49.750 48.450
106770751.311 8 83198018.22848 20317779.660
20317772.480 50.450 49.050
121386401.948 8 94586825.510 7 90645728.895 8 23099044.340 23099043.100
23099042.440 49.150 44.400
126907428.349 7 98888971.146 7 94768625.664 8 24149650.320 24149650.700
24149650.260 45.700 43.350
106015164.878 7 82456294.948 7 19832308.140 19832309.640
19832309.100 43.300 46.000
130610493.113 7 101585962.273 6 24467747.540 24467752.480
24467751.380 42.050 38.100

```

Figura 10.2: Fichero de observación RINEX ALBA122A.16d

Como se puede observar, sigue la estructura de los archivos RINEX de observación.

10.5.2. Ficheros de mensaje de navegación

Cada sistema de navegación (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) presenta un fichero de navegación. No obstante, todos siguen la misma estructura y contienen el mismo tipo de información.

	<p>el tiempo en el sistema UTC:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ A0, A1: Términos del polinomio. ○ T: Tiempo de referencia para datos UTC. ○ W: Número de la semana UTC de referencia
LEAP SECONDS	- Error en el tiempo por el salto de segundo.
END OF HEADER	- Final de cabecera
OBS. RECORD	
Grupo 1	<ul style="list-style-type: none"> - Número PRN, año, mes, día, hora, min, sec. - Error del reloj de satélite (s). - Deriva del reloj del satélite (s/s). - Período de deriva (s^{-1})
Grupo 2	<ul style="list-style-type: none"> - Edad de las efemérides (s). - Corrección Crs (m). - Diferencia media de movimiento (rad/s). - Anomalía media (rad).
Grupo 3	<ul style="list-style-type: none"> - Corrección Cuc (rad). - Excentricidad. - Corrección Cus (rad). - Raíz cuadrada del semieje mayor ($m^{1/2}$).
Grupo 4	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de las efemérides (segundos de semana GPS). - Corrección Cic (rad). - Nodo de longitud (OMEGA) (rad). - Corrección Cis (rad).
Grupo 5	<ul style="list-style-type: none"> - Inclinación (rad). - Corrección Crc (m). - Argumento del perigeo (omega) (rad). - Velocidad del nodo de longitud (OMEGA DOT) (rad/s).
Grupo 6	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de inclinación (IDOT) (rad/s). - Códigos en el canal L2. - Semana GPS. - Aviso de datos de código P en L2.
Grupo 7	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión del satélite (m). - Salud del satélite (entrada MSB). - Retardo ionosférico (TGD) (s). - Edad de los datos del reloj (s).
Grupo 8	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de transmisión del mensaje (s de semana GPS). - De repuesto / sin información. - De repuesto / sin información. - De repuesto / sin información.

Figura 10.4: Fichero de Navegación RINEX

10.6. Obtención de datos

Tras la explicación del formato y estructura de los ficheros de datos que se necesitan en la realización del proyecto, se procede a la obtención de dichos datos GNSS. Para ello, se hace uso del organismo internacional para la obtención de datos GNSS: International GNSS Service (IGS), una federación integrada por más de 200 agencias que proveen recursos y datos para los usuarios en todo el mundo.

En España existe una agencia encargada del almacenamiento de datos GNSS: el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Existe una red de estaciones permanentes GNSS, conocidas como ERGNSS, que cubren todo el territorio nacional y que ha sido desarrollada por el área de geodesia del IGN.

Los objetivos de esta red son:

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos sistemas de referencia globales en España.
- Ser puntos fundamentales de la Red Europea de estaciones permanentes (EPN: European Permanent Network).
- Utilización de los registros de datos para estudios troposféricos, ionosféricos, meteorológicos, etc.
- Definir una red fundamental para apoyar aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales.
- Proporcionar a los usuarios GNSS datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.

A día de hoy, dicha red se compone de 48 estaciones. De entre estas estaciones, 20 están integradas en la red europea de EUREF y 2 en la red mundial del IGS.

Para la realización del TFG los datos se han obtenido de la estación permanente situada en Albacete con código ALBA.

Las coordenadas del emplazamiento de la antena de la estación que se emplearán en la simulación posterior se encuentran en la reseña de la misma.

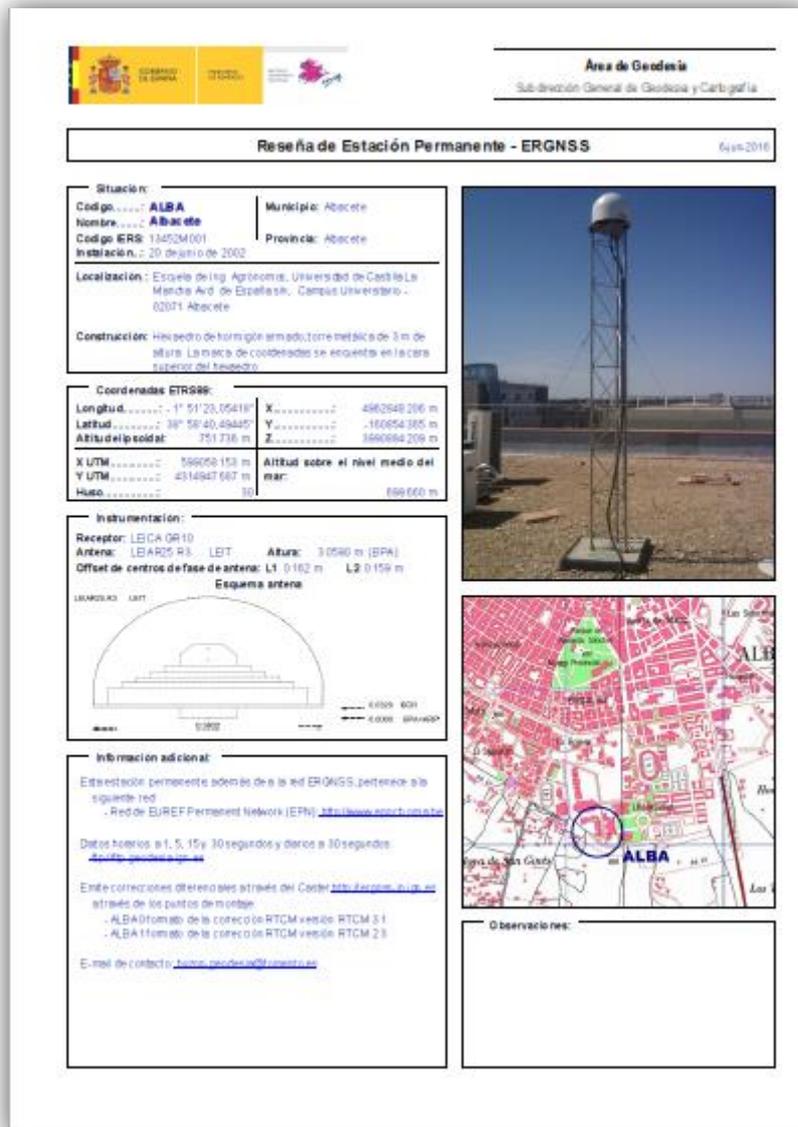


Figura 10.5: Estación de Albacete

10.6.1. Servidor FTP

Existe un servidor FTP (File Transfer Protocol), dispuesto por el IGN, que permite el acceso público a los datos de las estaciones. De este modo, se pueden descargar datos a distintas frecuencias y en ficheros diarios u horarios para aplicaciones GNSS de post-proceso.

Dependiendo de la frecuencia a la que se toman los datos y de su fecha, existen distintas carpetas de organización. En este caso, se han tomado archivos RINEX con datos tomados con una frecuencia de una toma por segundo, por lo que el directorio al que se accederá para ello es el que lleva por nombre `horario_1s` y, una vez en él, se seleccionan las fechas de los días deseados. En el caso estudiado, dichos días son del 1 al 5 de junio de 2016, lo que se traduce en fecha GPS de los días 122 al 126 de la estación situada en Albacete cuyo nombre es ALBA.

Los archivos se encuentran organizados de forma horaria en el FTP del IGN, lo que complica la tarea de obtención de los ficheros. Se deben descargar tanto los ficheros de navegación como los de observación para las 24 horas de los 5 días que ocupa la simulación, lo que implica que el total de archivos descargados sea de 240. Además, la organización no se realiza alfabéticamente, por lo que la tarea de descarga resulta tediosa y complicada. El directorio se muestra a continuación.

Índice de /ERGNSS/horario_1s/20160601/

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
[directorio principal]		
ALBO153J.16N.Z	3.5 kB	1/6/16 12:05:00
ALBO153H.16G.Z	3.0 kB	1/6/16 10:04:00
JACA153O.16G.Z	4.6 kB	1/6/16 17:02:00
MAL1153W.16N.Z	9.3 kB	2/6/16 2:01:00
CARG153V.16N.Z	7.2 kB	2/6/16 0:01:00
COBA153A.16S	18.5 kB	1/6/16 3:05:00
CANT153R.16d.Z	570 kB	1/6/16 20:01:00
ALBA153K.16G.Z	5.1 kB	1/6/16 14:01:00
IGNE153R.16d.Z	386 kB	1/6/16 20:02:00
ALOR153Q.16d.Z	538 kB	1/6/16 19:03:00
SJOR153J.16d.Z	575 kB	1/6/16 12:05:00
LUGO153Q.16d.Z	529 kB	1/6/16 19:03:00
CUEN153H.16N.Z	7.3 kB	1/6/16 10:03:00
SNTG153W.16G.Z	4.7 kB	2/6/16 1:03:00
CARG153D.16G.Z	4.8 kB	1/6/16 6:01:00
CARG153K.16N.Z	9.5 kB	1/6/16 14:05:00
MAL1153T.16S	19.5 kB	1/6/16 23:01:00
ARDU153X.16G.Z	5.0 kB	2/6/16 2:03:00
CEU1153T.16d.Z	851 kB	1/6/16 22:02:00
LEON153J.16S	19.9 kB	1/6/16 12:07:00
CACE153P.16S	17.2 kB	1/6/16 18:01:00
TUD1153R.16N.Z	3.1 kB	1/6/16 20:03:00
HUEL153K.16N.Z	6.1 kB	1/6/16 13:01:00
SALA153V.16d.Z	617 kB	2/6/16 0:04:00
FUER153X.16S	18.3 kB	2/6/16 3:03:00
YEB1153C.16G.Z	4.9 kB	1/6/16 5:04:00

Figura 10.6: Directorio FTP para el 1 de junio de 2016

Existe otro método más rápido y efectivo para la descarga de los archivos RINEX. Dicha alternativa se encuentra en la descarga del Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG), un software libre del IGN.

El uso de esta aplicación es sencillo, ya que basta con seleccionar en el mapa la estación deseada (ALBA), la hora y la fecha, así como la frecuencia de toma de datos. Una vez realizada esta tarea, el programa descarga 2 ficheros: uno de observación y otro de navegación, para la fecha y hora seleccionadas. Gracias al uso de este programa, el ahorro de tiempo ha sido considerable y se han descargado los archivos en formato .n de mensaje de navegación y .d de observación en formato comprimido Hatanaka.

La imagen mostrada a continuación muestra la interfaz del programa

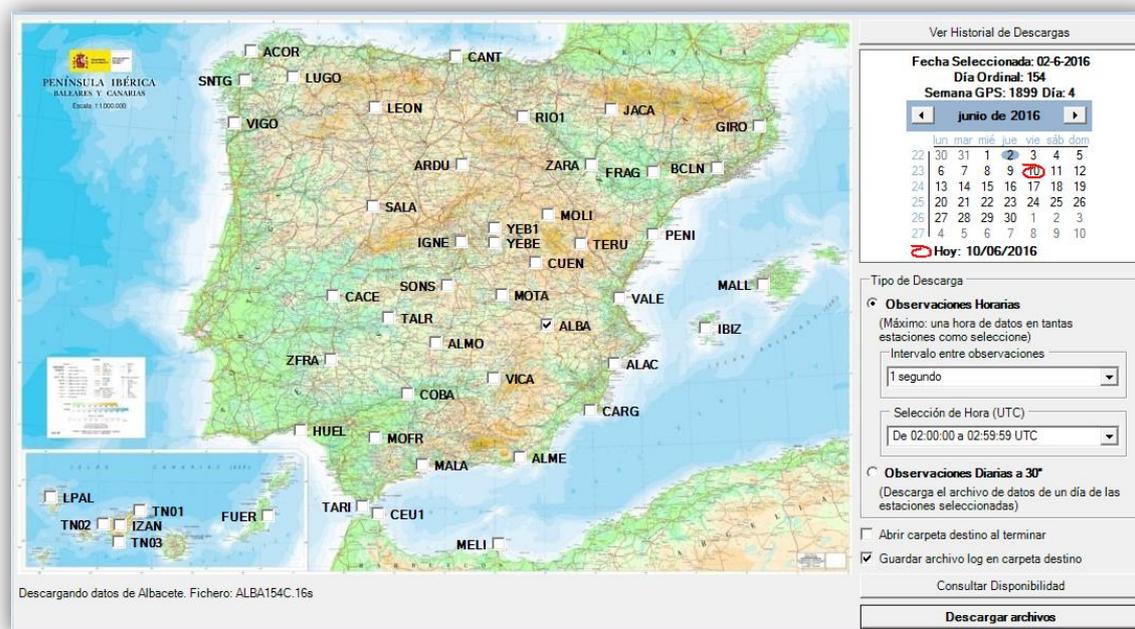


Figura 10.7: Interfaz del PAG

10.7. Ficheros SBAS

Al no presentar las prestaciones suficientes para validar un procedimiento de tipo LPV-200, GPS requiere el uso de un sistema de aumentación que mejore dichas prestaciones (precisión, integridad, continuidad y disponibilidad). En este caso se trata del sistema Europeo EGNOS, como ya se ha mencionado anteriormente.

El sistema encargado de guardar y suministrar los datos a los usuarios para EGNOS es EDAS (EGNOS Data Access System).

Dicho servicio ofrece datos comerciales terrestres y soporta el uso de varias constelaciones GNSS, entre las cuales se encuentra Galileo, mediante la difusión de los servicios de EGNOS en tiempo real. Los datos de EGNOS se proporcionan en distintos formatos, siguiendo siempre el estándar RTCM.

Para la obtención de dichos datos, es preciso ponerse en contacto con el servicio de EGNOS Helpdesk, en el que se solicita un usuario y contraseña que permite el acceso al FTP de EDAS en el que se encuentran los datos SBAS en diferentes formatos. A continuación, se debe instalar un programa de ayuda y visualización de directorios de la FTP, llamada en este caso WinSCP, que permite un acceso más sencillo y ordenado a los archivos mencionados.

En este directorio, el orden es, inicialmente, cronológico, siendo necesario seleccionar el año seguido del día (en calendario GPS) necesario para la simulación. Tras esto, se debe elegir entre las estaciones disponibles para descargar y el formato deseado para el archivo.

De entre los formatos ofrecidos por EDAS, es necesario el tipo .b. Es posible, además, descargarlos en formato .ems o los datos en raw. Cabe destacar que los archivos RINEX SBAS en formato .b son diarios, por lo que constituye una gran ventaja con respecto a los ficheros de observación y navegación. Hay un total de 5 ficheros SBAS para toda la simulación en comparación a los 120 de observación y de navegación.

La imagen mostrada a continuación es una captura del FTP de EDAS.

Los archivos siguen la nomenclatura descrita a continuación:

Nombre	Tamaño	Modificado	Permisos	Propiet...
ROMA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
ROMB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
SDCA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
SDCB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
SOFA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
SOFB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
SWAA		02/05/2016 2:05:03	rw-rw-r--	500
SWAB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
TLSA		02/05/2016 2:05:03	rw-rw-r--	500
TLSB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
TRDA		02/05/2016 2:05:03	rw-rw-r--	500
TRDB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
TROA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
TROB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
WRSA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
WRSB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
ZURA		02/05/2016 2:05:02	rw-rw-r--	500
ZURB		02/05/2016 2:09:02	rw-rw-r--	500
brdc1220.16B.Z	4.088 KB	02/05/2016 2:14:03	rw-rw-r--	500
brdc1220.16G.Z	60 KB	02/05/2016 2:11:01	rw-rw-r--	500
brdc1220.16N.Z	49 KB	02/05/2016 2:07:01	rw-rw-r--	500
e20g1220.16I.Z	7 KB	02/05/2016 2:00:01	rw-rw-r--	500
e23g1220.16I.Z	7 KB	02/05/2016 2:00:01	rw-rw-r--	500
e26g1220.16I.Z	3 KB	02/05/2016 2:00:01	rw-rw-r--	500
e36g1220.16I.Z	7 KB	02/05/2016 2:00:01	rw-rw-r--	500

Figura 10.8: Captura del FTP de EDAS

brdcddd0.yyB.Z

Dónde:

- ddd es el día del año de los datos del archivo, en este caso del 122 al 126.
- yy son los dos últimos dígitos del año de recogida de los datos, en este caso el 16.

Por lo tanto, una vez descargados estos datos del FTP de EDAS, se posee ya todo lo necesario para la segunda etapa del proceso de validación de procedimientos de la campaña sobre el terreno.

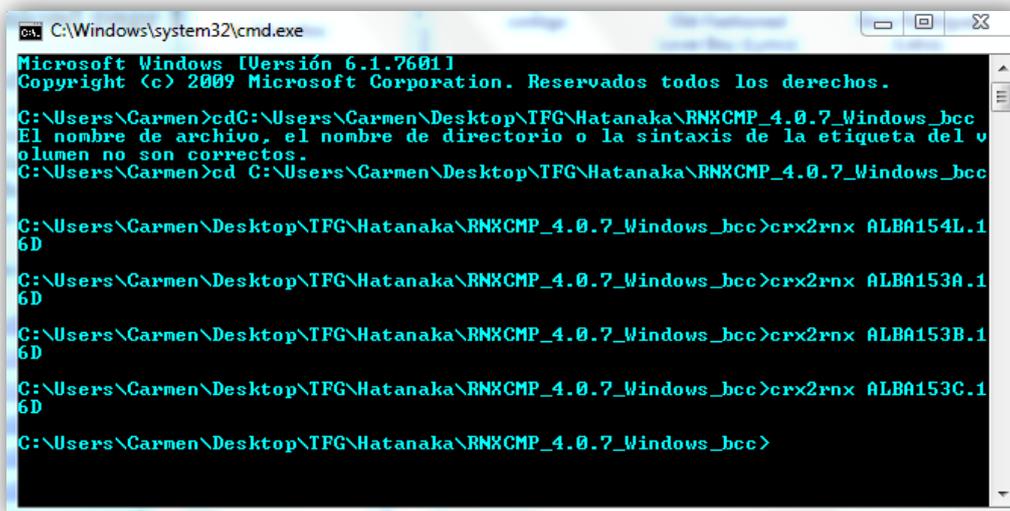
- Ficheros de observación: en formato comprimido Hatanaka .d ALBA12[2-6][A-X].16d que suman un total de 120.
- Ficheros de mensaje de navegación: en formato .n ALBA12[2-6][A-X].16n.
- Ficheros SBAS: en formato .b (BRDC12[2-6]0.16b).

Con todo esto, se comienza con la manipulación de datos introducidos en el programa de simulación. Para ello se ha hecho uso de los programas Hatanaka y TEQC.

10.8. Hatanaka

Para descomprimir los archivos de observación en formato comprimido de tipo .d y convertirlos en tipo .o, es necesario el uso de la herramienta Hatanaka. Se trata de un software libre del que se hace uso mediante la ventana de comandos de Windows. Su utilización es bastante sencilla, ya que posee dos comandos principalmente: el crx2rnx, para descomprimir los archivos, y el rnx2crx para comprimirlos.

Para ejecutar los comandos de la consola, es necesario que todos los archivos se encuentren en la misma carpeta que la de instalación de HATANAKA, por lo que se copiaron los archivos descargados del IGN a dicha carpeta. Una vez realizado este proceso, se ejecuta el comando crx2rnx para cada uno de los 120 archivos de observación con la finalidad de descomprimirlos. El espacio ocupado en disco es mucho mayor una vez se han descomprimido.



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

C:\Users\Carmen>cd C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc
El nombre de archivo, el nombre de directorio o la sintaxis de la etiqueta del volumen no son correctos.
C:\Users\Carmen>cd C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc

C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc>crx2rnx ALBA154L.16D
C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc>crx2rnx ALBA153A.16D
C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc>crx2rnx ALBA153B.16D
C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc>crx2rnx ALBA153C.16D
C:\Users\Carmen\Desktop\TFG\Hatanaka\RNXCMP_4.0.7_Windows_bcc>
```

Figura 10.9: Captura de pantalla de la descompresión de ficheros RINEX usando Hatanaka en la ventana de comandos

trataba de información no recogida, con lo que se puede considerar que el archivo se concatenó correctamente y que los errores son de la propia estación, no de la concatenación.

El resultado es un conjunto de 15 archivos, 10 de ellos resultantes de la concatenación de los ficheros RINEX y 5 descargados del FTP de EDAS.

11. Software

Para la realización del proyecto se han empleado distintos programas. No todos ellos se han utilizado para el desarrollo del proyecto en sí, sino que algunos han servido tan solo como herramienta para familiarizarse con el entorno de certificación de EGNOS y los mensajes empleados por el mismo. Los de mayor complejidad se han empleado, sin embargo, para la obtención de datos y gráficos y realización de simulaciones, gracias a los cuales ha sido posible la extracción de conclusiones.

En el siguiente apartado se procede a la descripción de los diferentes programas empleados.

11.1. SBAS Teacher

El programa SBAS TEACHER (SBAS Tool for Education And Contributor to Harness EGNOS Research) es un software desarrollado por la Agencia Espacial Europea o ESA. Se emplea como herramienta complementaria a EDAS y SISNET. No obstante no se ha empleado para el desarrollo del proyecto como tal. La interfaz del programa se muestra a continuación.



Figura 11.1: Interfaz del programa SBAS TEACHER

El programa permite descifrar mensajes SBAS de EGNOS, cambiar su contenido o realizar nuevas codificaciones del mismo, así como la creación de nuevos mensajes SBAS desde cero

con sus distintos tipos de mensaje. Este programa presenta una evolución conocida como SBAS mentor que se describe a continuación.

11.2. SBAS MENTOR

El software SBAS MENTOR (SBAS Message GENerator) continúa con la idea del SBAS TEACHER. Para ello, trabaja con el formato de archivo EMS (EGNOS Message System) de la ESA y permite cargar datos reales de EGNOS mediante otra plataforma conocida como SISNET.



Figura 11.2: Interfaz del programa SBAS MENTOR

El programa se utiliza en este proyecto para visualizar y cambiar parámetros del mensaje ya existentes o crear nuevos mensajes sin la necesidad de cargar datos. Se pueden seleccionar los satélites operativos con sus máscaras PRN correspondientes mediante la configuración de los distintos tipos de mensaje, así como seleccionar y cambiar la cuadrícula IGP (Ionospheric Grid Points).

11.3. SISNET UAS

La ESA posee una plataforma conocida como SISNET que combina la información de EGNOS e Internet y que trabaja a tiempo real. El software principal de dicha plataforma es SISNET UAS (User Application Software) que permite la visualización del contenido de los mensajes de EGNOS en tiempo real y de forma muy sencilla. Para ello, realiza un análisis sobre los distintos tipos de mensajes. Su interfaz se muestra a continuación.

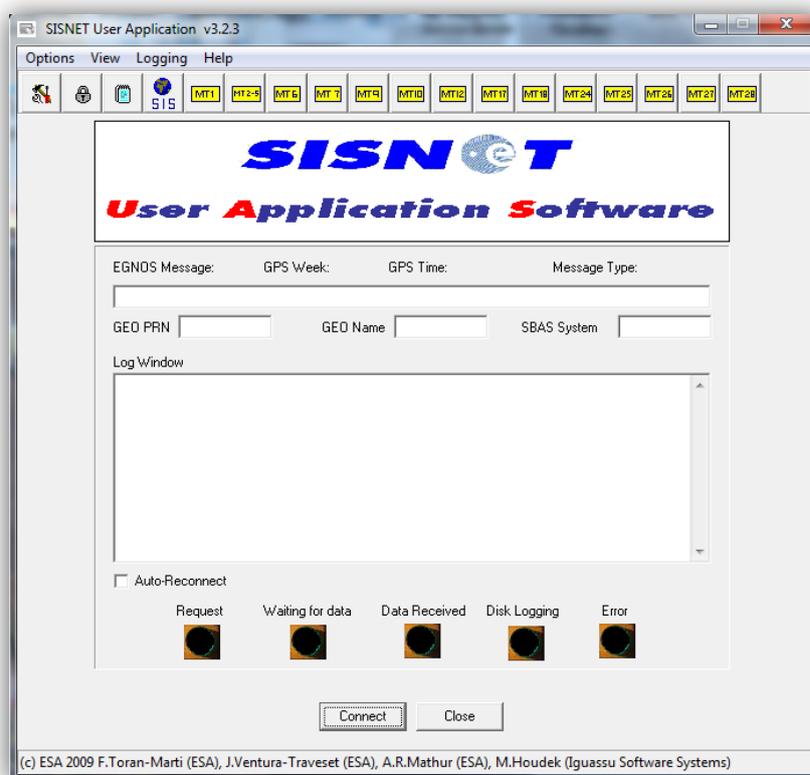


Figura 11.3: Interfaz del programa SISNET UAS

11.4. SISNET lab

Por otro lado, SISNET presenta otro software conocido como SINET lab, diseñado para el postproceso de las señales de EGNOS. Esto permite realizar análisis con los mensajes recibidos y muestra en pantalla los resultados gráficamente y fácilmente comprensible.

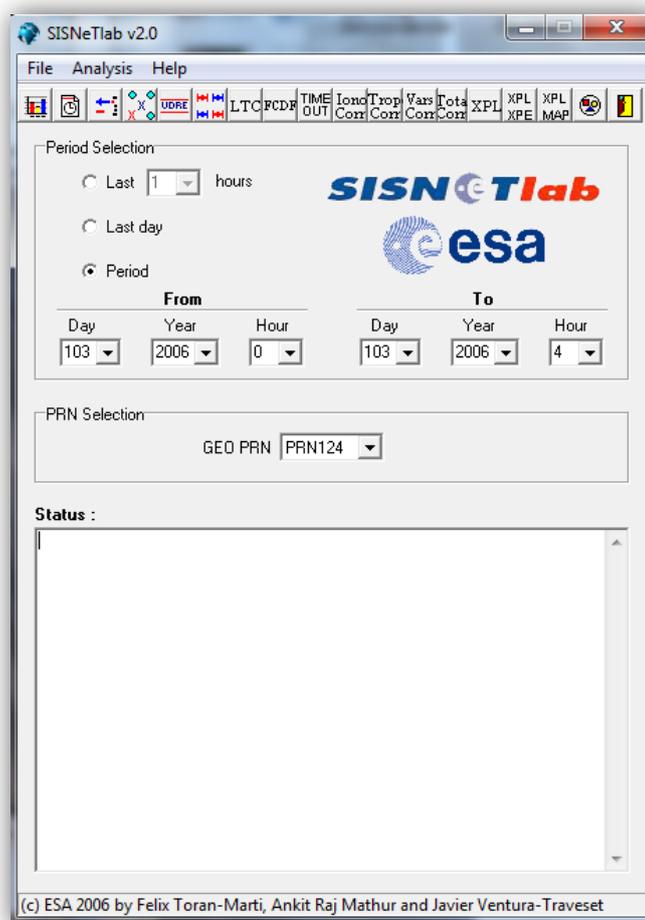


Figura 11.4: Interfaz del programa SISNET LAB

Para realizar un análisis, se selecciona en la interfaz del programa el periodo de tiempo deseado, el tipo de análisis y el PRN del satélite a analizar. También es posible realizar análisis de cada uno de los tipos de mensaje (MT) de EGNOS mediante la extracción de los gráficos en pantalla.

11.5. PEGASUS

El programa del que se va a hablar a continuación, desarrollado por EUROCONTROL, es uno de los empleados para el desarrollo del proyecto. Permite el análisis de los datos recibidos tanto de sistemas SBAS como GBAS.

Posee una serie de herramientas para asistir a los usuarios de los sistemas de navegación aérea para la evaluación del comportamiento de las señales en el espacio de los satélites y su

umentación. Entre estas herramientas se encuentra determinación de los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad, errores de trayectoria o simulaciones de algoritmos de procesamiento de las estaciones de tierra.

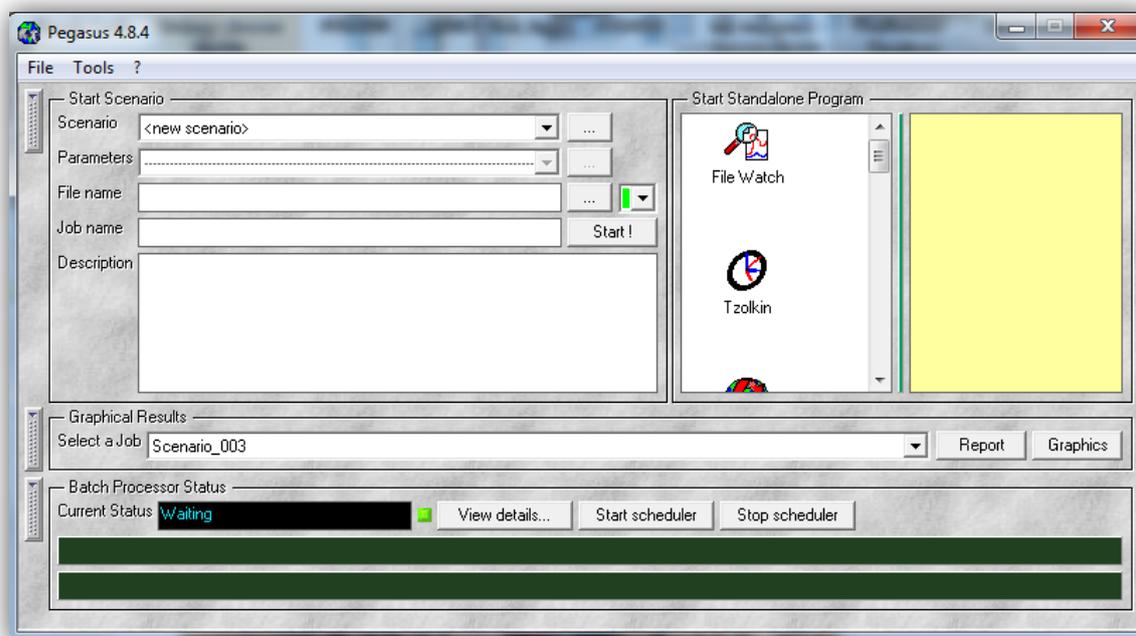


Figura 11.5: Interfaz del programa PEGASUS

El programa hace uso de distintos módulos para distintas funciones, que se explican a continuación y que corresponden a módulos de soluciones GNSS para mensajes de datos SBAS de EGNOS y gráficas para analizar su comportamiento.

Existen distintos escenarios para la simulación proporcionados por EUROCONTROL para la comprensión del software PEGASUS. Antes de la simulación definitiva, se realizaron los tutoriales para los distintos escenarios proporcionados. En cuanto a la experiencia con el programa para la realización de este TFG, los problemas obtenidos y su solución se detalla en el último punto de este apartado.

11.5.1. Convertor

La primera etapa de un proyecto en Pegasus es el módulo convertidor, o “convertor”, cuya función es la toma de datos introducidos del receptor GNSS y traducirlos a un formato genérico para su análisis. Hace uso de inputs de diferentes receptores GNSS, SBAS en este caso, para convertirlos en formato ASCII.

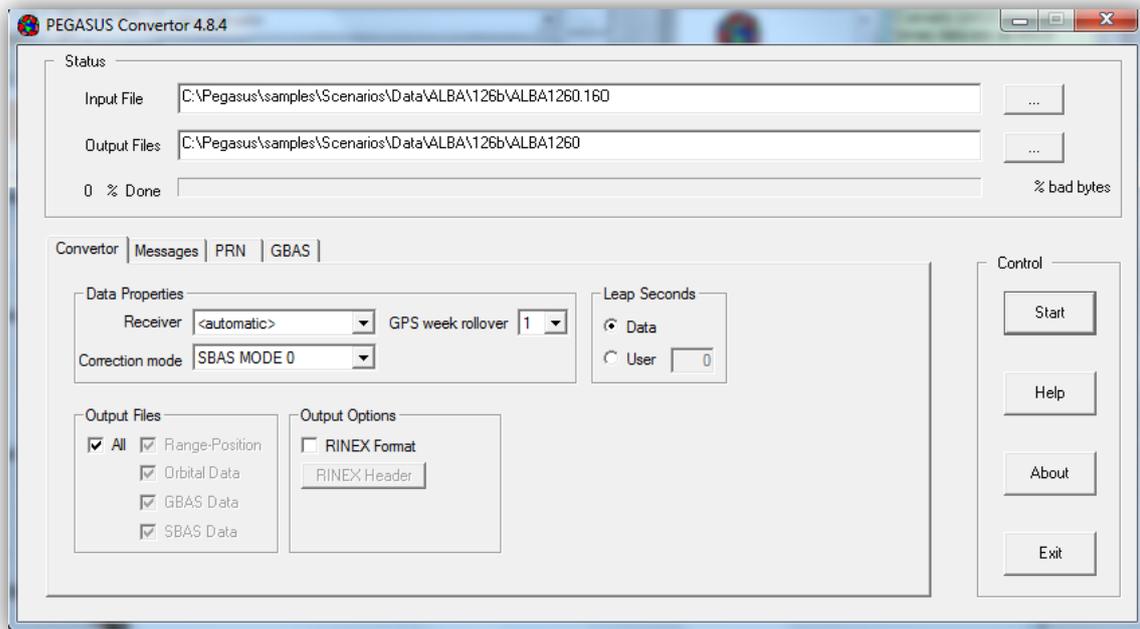


Figura 11.6: Interfaz del módulo Convertor de PEGASUS

Para este proyecto, se han introducido los datos recogidos para la estación ALBA (Albacete). Como input se seleccionan los ficheros de observación RINEX, siendo el propio módulo el que busca el resto de ficheros (navegación y SBAS) con el mismo nombre que el introducido. Para que el programa sea capaz de ello, se ha cambiado el nombre de los ficheros SBAS a ALBA12x0.16b, siendo x el día GPS. Esto permite generar un único archivo que, posteriormente, se introducirá en el módulo GNSS Solution explicado a continuación.

11.5.2. GNSS Solution

Para realizar los cálculos a partir de los datos obtenidos del convertidor se emplea el módulo GNSS_Solution. Con ello, es posible obtener la posición y XPLs (ficheros de configuración de los distintos niveles de protección). Tras su ejecución, el programa podrá usar los módulos gráficos para visualizar los resultados.

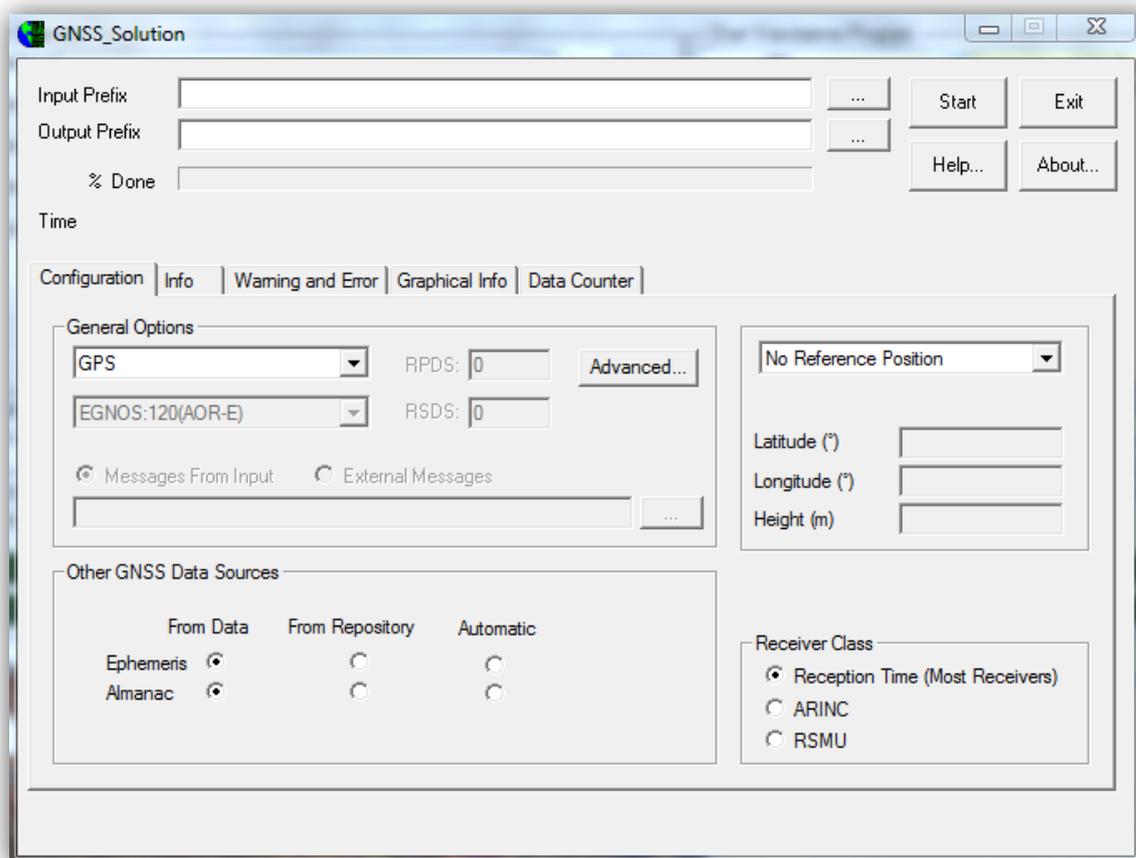


Figura 11.7: Interfaz del módulo GNSS Solution de PEGASUS

En este módulo, se deben introducir los archivos generados por el Convertor. Se trata de un proceso lento que precisa de una gran cantidad de tiempo para completarse. Se ha ejecutado 5 veces, una por cada día, lo que ha supuesto un gran inversión de tiempo. Para su correcto funcionamiento, es necesario pedir al programa que prescindiera del almanaque, de la misma manera que se ha debido cambiar en General Options la opción a SBAS. Por otro lado, es necesario introducir las coordenadas de la estación de Albacete para conseguir los resultados deseados. Este módulo generará, de nuevo, otro archivo que deberá introducirse en el MFile Runner, explicado en el siguiente apartado.

11.5.3.MFileRunner

Finalmente, para visualizar los resultados obtenidos para poder analizar los datos mediante gráficas, es necesario el módulo MFileRunner. Gracias a dichas gráficas es posible evaluar los datos GPS/SBAS de forma estandarizada. Para el caso de la visualización de los datos SBAS, el módulo genera gráficas con correcciones rápidas, lentas, ionosféricas y estadísticas de la señal en el espacio.

- **Análisis de las correcciones lentas SBAS:** Analiza la máscara PRN y evalúa los datos de las correcciones lentas. Genera gráficas interactivas de tiempo y estadísticas de las correcciones lentas para los satélites contenidas en la máscara PRN.
- **Análisis de las correcciones ionosféricas SBAS:** Analiza la máscara IGP y valúa los retrasos verticales de la señal. Genera gráficas de los retrasos y de un mapa para todo el área geográfica.
- **Distribución del mensaje SBAS:** Analiza la distribución en cantidad, tiempo y frecuencia de emisión de los mensajes. Genera una tabla con el número de mensajes emitidos y muestra la distribución del mensaje y gráficos de diferencias de tiempo.

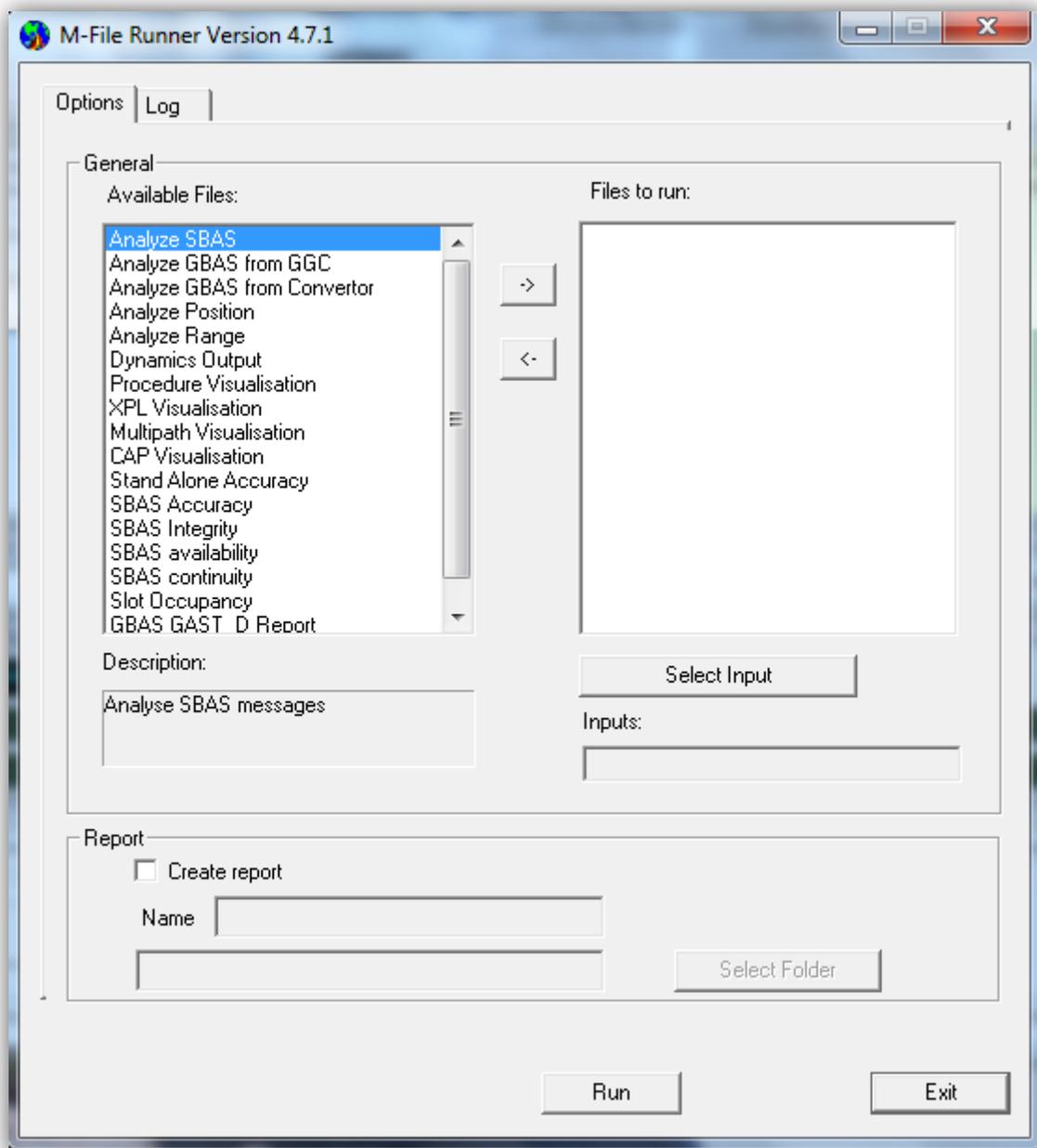


Figura 11.8: Interfaz del módulo MFileRunner de PEGASUS

La obtención de los datos en forma de resultados y gráficas permite analizar la simulación EGNOS.

En este proyecto, se han generado las gráficas de integridad del sistema, que incluyen dos diagramas de Stanford, uno para la posición vertical y otro para la horizontal, así como la representación del HSI y del VSI. Nuevamente, se ha debido ejecutar el módulo 5 veces, una por cada día. También se han obtenido los valores de HSNE y VSNE para cada uno de los 5 días, los histogramas con los resultados para HPE, VPE, HPL, VPL para los cinco días y un resumen

con los valores de continuidad, disponibilidad e integridad. Se ha hecho uso de las opciones Analyze Position, SBAS accuracy, SBAS continuity y SBAS availability. Con ello, se puede afirmar que se han obtenido los resultados necesarios para comprobar si se cumplen los requerimientos.

11.5.4. Trabajo con PEGASUS

Para la obtención de resultados con PEGASUS, se han realizado, previamente, los tutoriales GBAS proporcionados por EUROCONTROL. Los tutoriales disponen de 8 Scenarios distintos, cada uno con una misión.

- Scenario_001: Simulación de mensajes GBAS basada en GNSS.
- Scenario_002: Solución de posición GBAS.
- Scenario_003: Utilización de datos externos para la computación de la posición estática de un GBAS.
- Scenario_004: Análisis de datos simulados.
- Scenario_005: Manipulación de mensajes GBAS.
- Scenario_006: Simulación basada en el contexto.
- Scenario_007: Simulación de mensajes y error de posición GBAS.
- Scenario_008: Errores de trayectoria dinámica.

Tras intentar la simulación de los diferentes escenarios, se observó que la mayoría de ellos dejaban el programa “colgado” y que no se llevaba a cabo la operación deseada. Tan sólo los escenarios 2,3 y 7 funcionaron correctamente. Para solucionar dichos problemas, se procedió a contactar con EUROCONTROL. La respuesta fue la confirmación de la existencia de un error en el Scenario_001. No obstante, tras realizar las instrucciones indicadas en el correo recibido, el Scenario continuaba sin funcionar. Con el objetivo de solventar el error persistente, se redactó un nuevo correo, cuya respuesta explicaba el motivo del no funcionamiento: los Scenarios proporcionados no podían ser empleados para analizar un SBAS.

Para solucionar los problemas, se concertó una conferencia con el contacto que había proporcionado respuesta en nombre de EUROCONTROL. No obstante, la solución al problema fue emplear los módulos Convertor, GNSS Solution y Mfile Runner de forma independiente y

no conjunta, como se hacía en los mencionados Scenarios. El contacto del que se dispuso en ENAIRE también supuso una gran ayuda en la comprensión y uso del software.

12. Resultados obtenidos

Tras la realización de los análisis para los cinco días de campaña sobre el terreno y con las gráficas obtenidas, se procede al análisis de los mismos. En esta etapa, se describirán los rendimientos obtenidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad ya mencionados y explicados anteriormente. Además, se comparará con los valores establecidos por la OACI para los procedimientos de aproximación con guiado vertical LPV-200.

12.1. Precisión

En este primer apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación para la precisión. Se analiza día a día, comenzando el 1 de Mayo de 2016 y finalizando el 5 del mismo mes. Dichos resultados dan el valor del HNSE y del VNSE. A continuación, aparecen los resultados obtenidos por días.

- Día 1 de mayo de 2016

<pre><name>HNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85562</samples> <mean>1.08031</mean> <rms>1.12823</rms> - <histogram></pre>	<pre><name>VNSE</name> <service>LPV200</service> <samples>85562</samples> <mean>3.28539</mean> <rms>3.345</rms> - <histogram></pre>
---	---

Figura 12.1: Resultados de precisión para el 1 de mayo

En la figura se puede observar que los resultados de precisión se encuentran dentro de los límites requeridos para LPV-200. Por un lado, el HNSE presenta un valor de 1.08, aproximadamente, inferior a los 16 m establecidos. Por su parte, el VNSE tiene un valor de 3.28, inferior a los 6 a 4 m requeridos.

- Día 2 de mayo de 2016

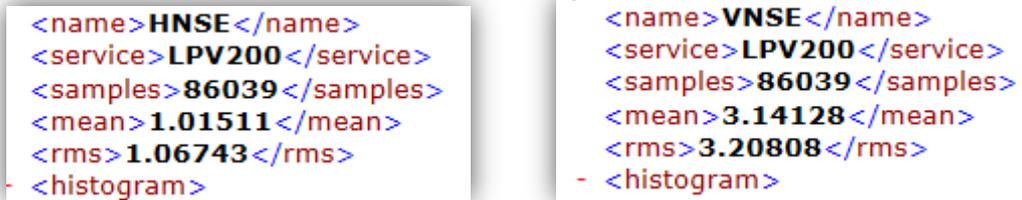


Figura 12.2: Resultados de precisión para el 2 de mayo

En la figura se puede observar que los resultados de precisión se encuentran dentro de los límites requeridos para LPV-200. Por un lado, el HNSE presenta un valor de 1.01, aproximadamente, inferior a los 16 m establecidos. Por su parte, el VNSE tiene un valor de 3.14, inferior a los 6 a 4 m requeridos.

- Día 3 de mayo de 2016

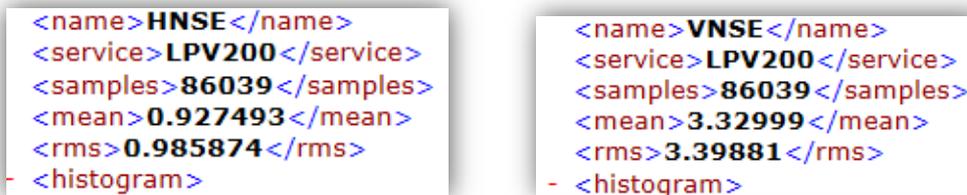


Figura 12.3: Resultados de precisión para el 3 de mayo

En la figura se puede observar que los resultados de precisión se encuentran dentro de los límites requeridos para LPV-200. Por un lado, el HNSE presenta un valor de 0.93, aproximadamente, inferior a los 16 m establecidos. Por su parte, el VNSE tiene un valor de 3.33, inferior a los 6 a 4 m requeridos.

- Día 4 de mayo de 2016

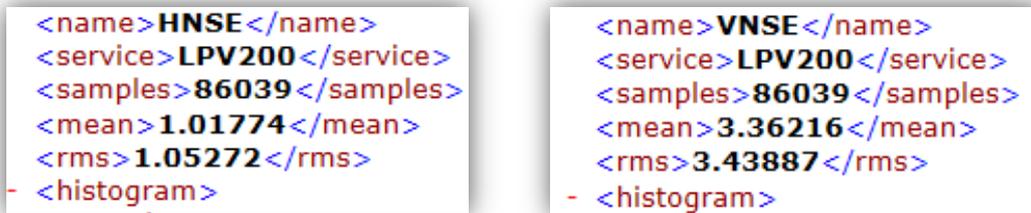


Figura 12.4: Resultados de precisión para el 4 de mayo

En la figura se puede observar que los resultados de precisión se encuentran dentro de los límites requeridos para LPV-200. Por un lado, el HNSE presenta un valor de 1.02, aproximadamente, inferior a los 16 m establecidos. Por su parte, el VNSE tiene un valor de 3.36, inferior a los 6 a 4 m requeridos.

- Día 5 de mayo de 2016

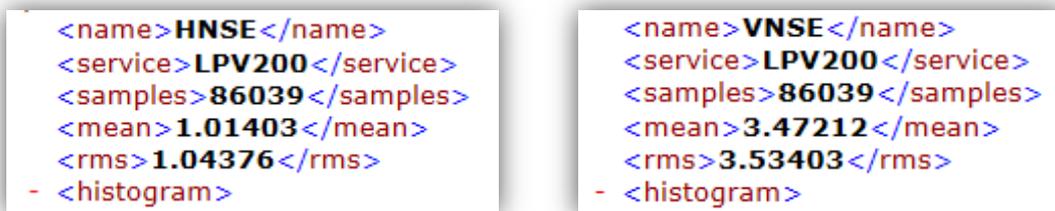


Figura 12.5: Resultados de precisión para el 5 de mayo

En la figura se puede observar que los resultados de precisión se encuentran dentro de los límites requeridos para LPV-200. Por un lado, el HNSE presenta un valor de 1.01, aproximadamente, inferior a los 16 m establecidos. Por su parte, el VNSE tiene un valor de 3.47, inferior a los 6 a 4 m requeridos.

Tras observar los resultados obtenidos para los diferentes días, se puede concluir que los valores de HNSE y VNSE obtenidos cumplen con los requisitos establecidos y que el sistema LPV-200 tiene la precisión suficiente para operar.

12.2. Integridad

En este apartado, aparecen los resultados obtenidos para la integridad. Dichos resultados se muestran recogidos por días, existiendo por cada día un diagrama de Stanford con el HPL vs el HPE y otro con el VPL vs el VPE, así como un diagrama que muestra el HSI y otro con el VSI. Se incluye también un histograma con los valores de HPE y VPE para cada día.

- Día 1 de mayo de 2016

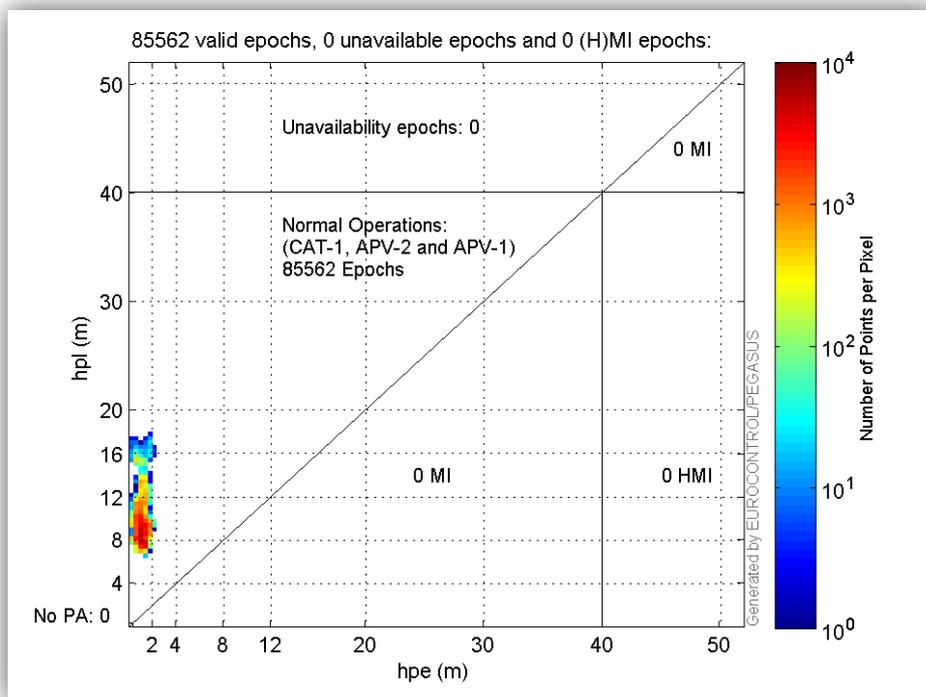


Figura 12.6: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 1 de mayo

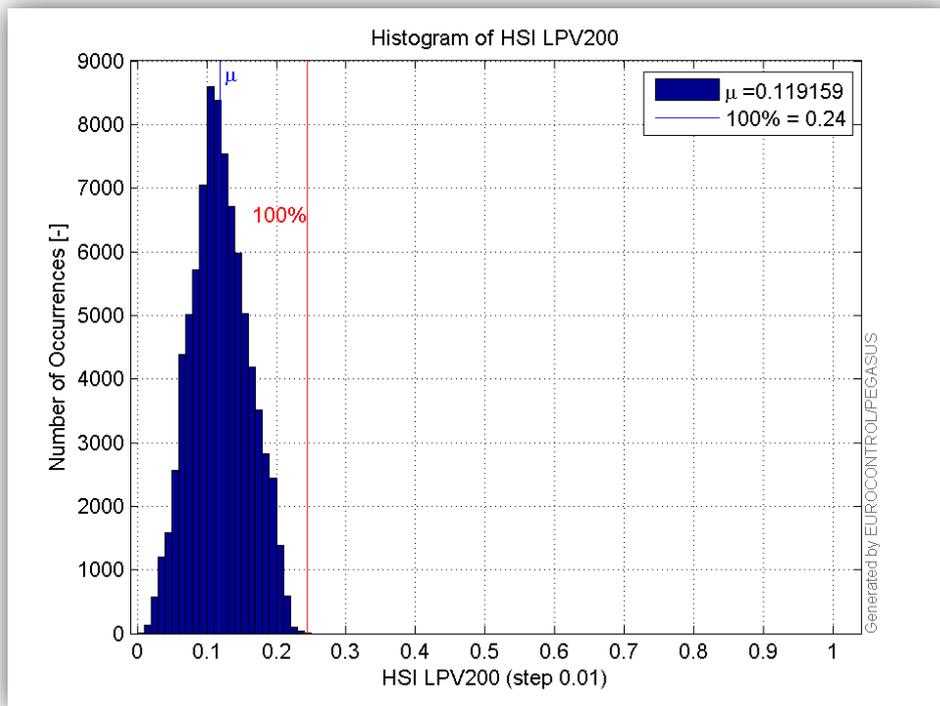


Figura 12.7: Resultados HSI para el 1 de mayo

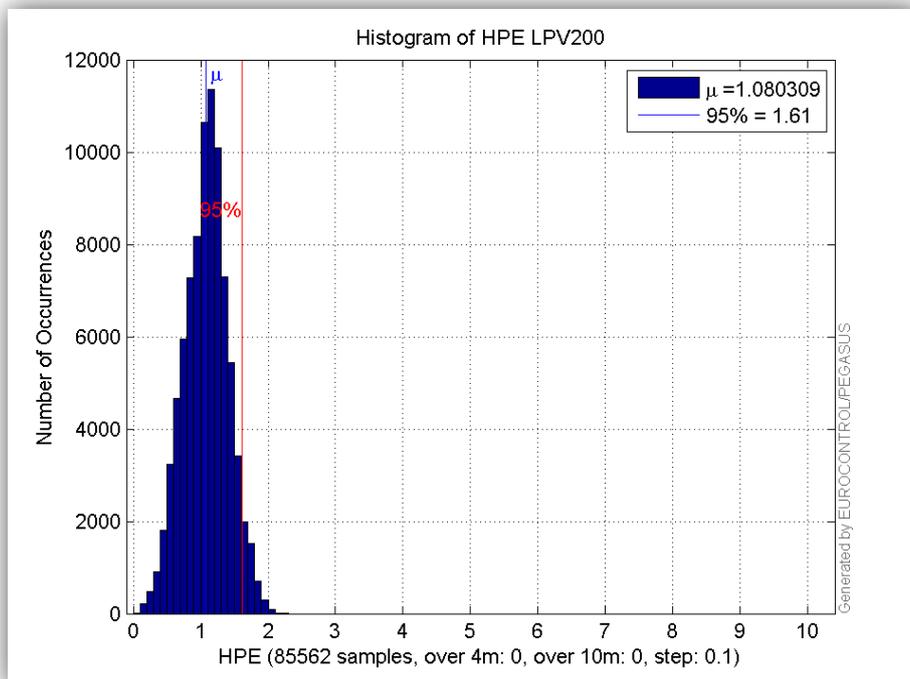


Figura 12.8: Resultados HPE para el 1 de mayo

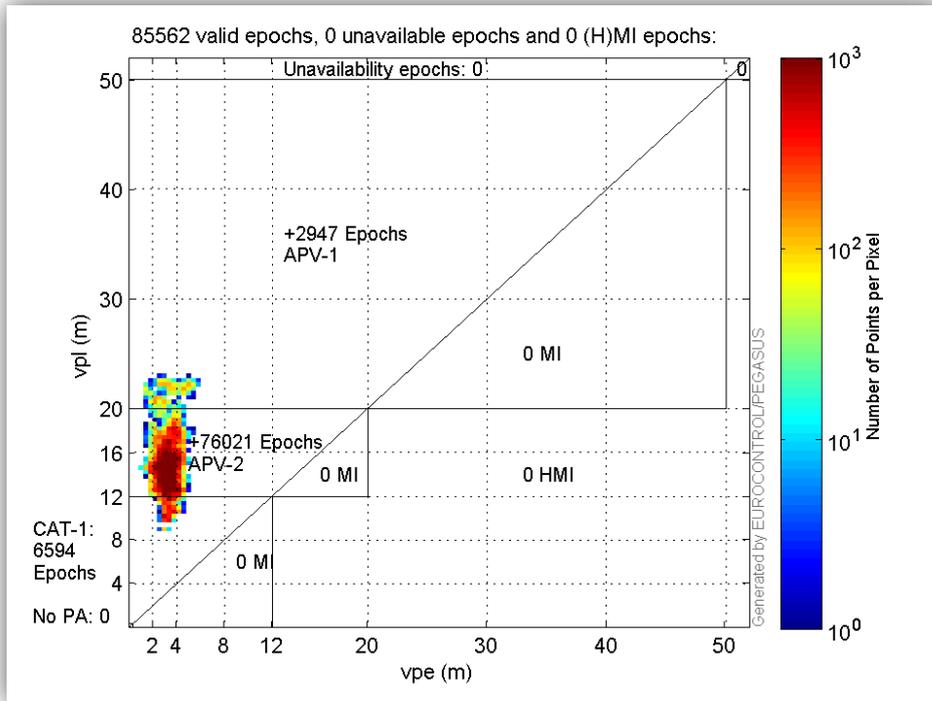


Figura 12.9: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 1 de mayo

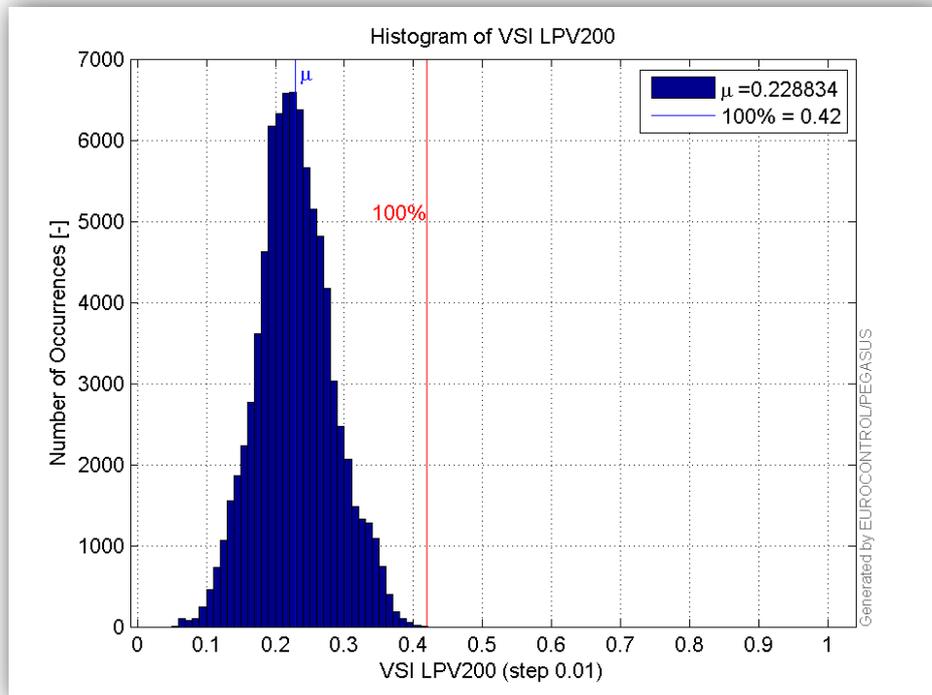


Figura 12.10: Resultados VSI para el 1 de mayo

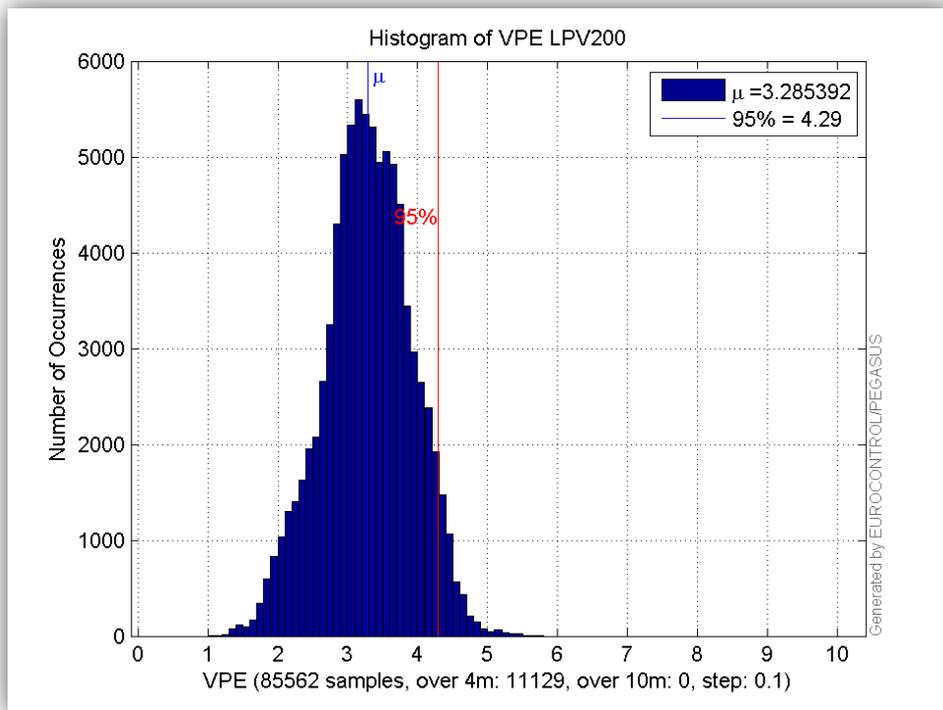


Figura 12.11: Resultados VPE para el 1 de mayo

- Día 2 de mayo de 2016

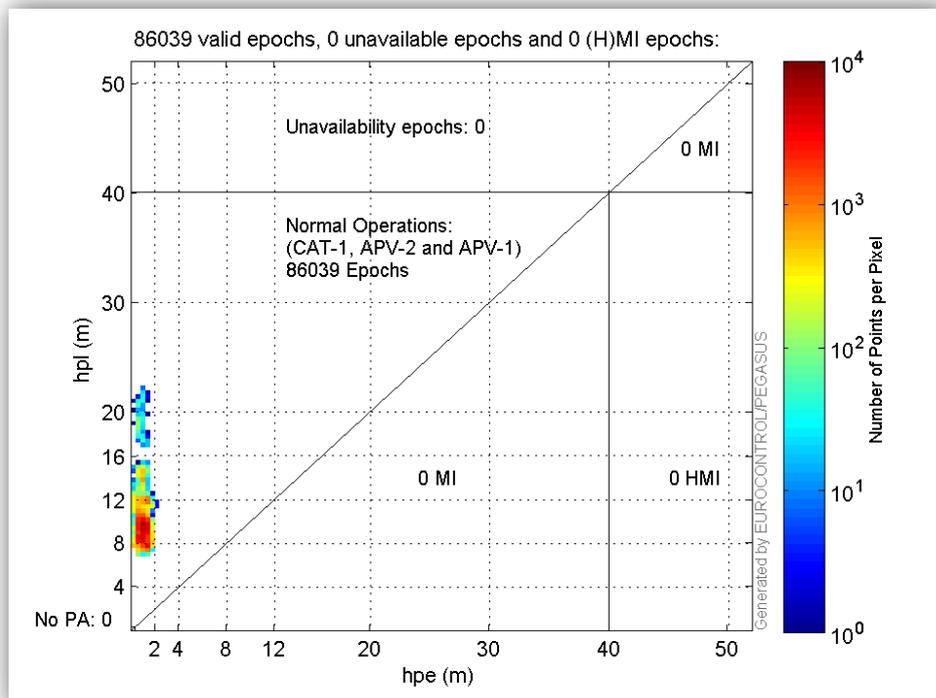


Figura 12.12: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 2 de mayo

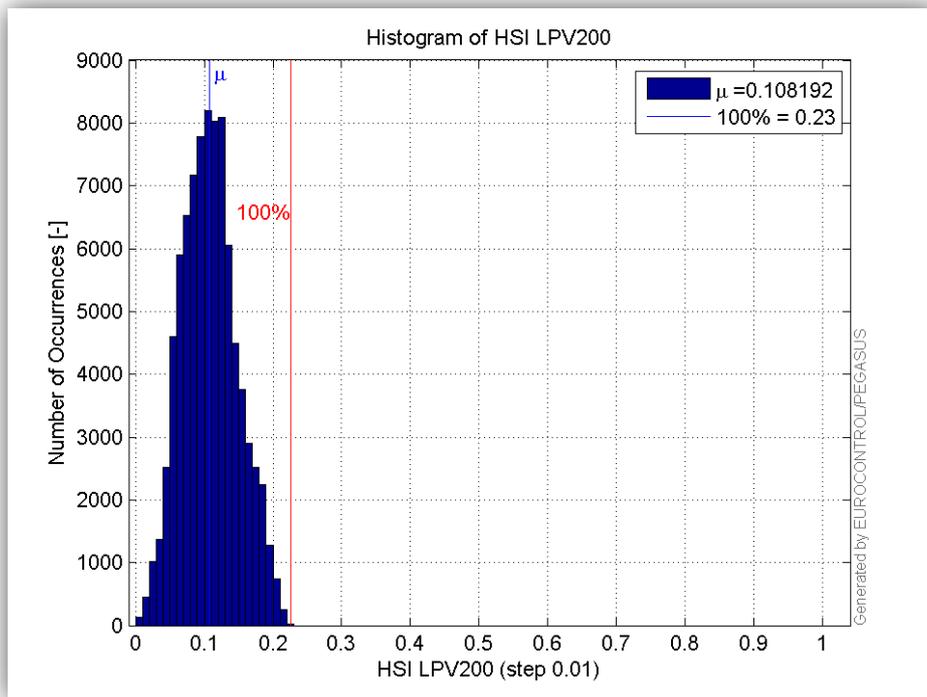


Figura 12.13: Resultados HSI para el 2 de mayo

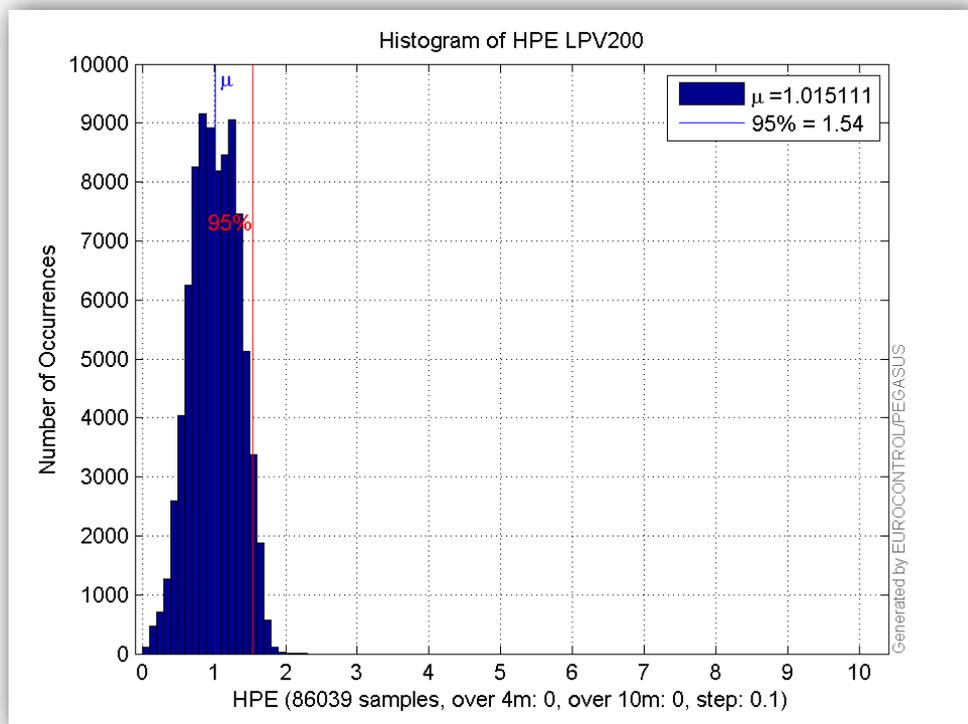


Figura 12.14: Resultados HPE para el 2 de mayo

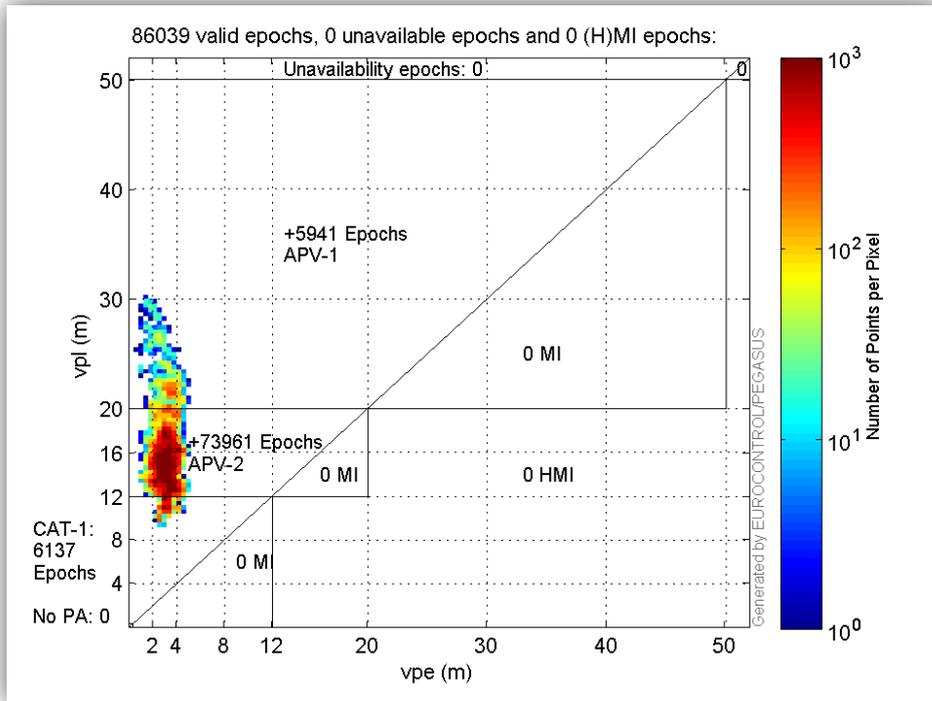


Figura 12.15: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 2 de mayo

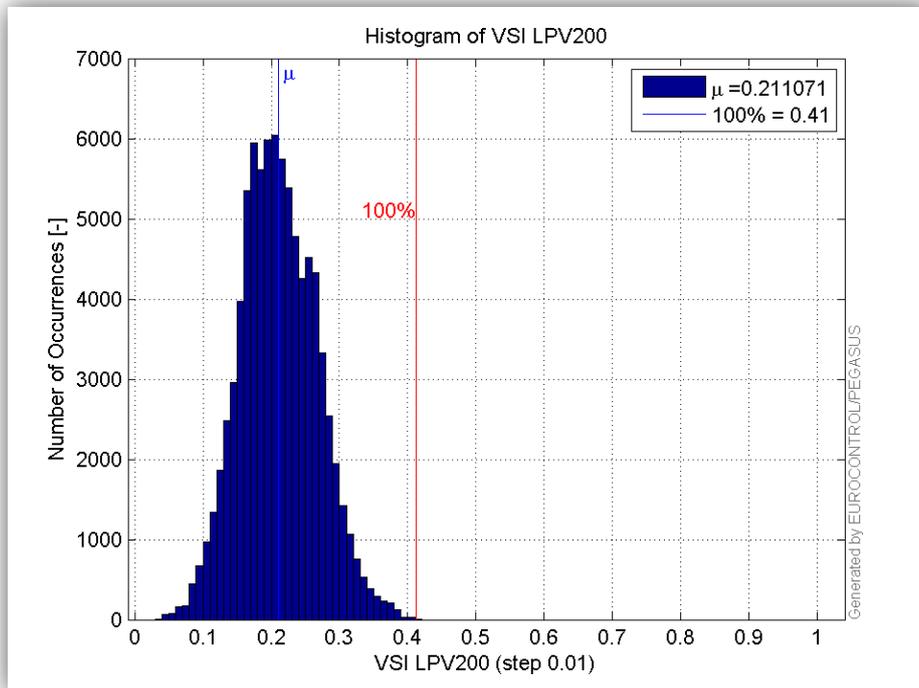


Figura 12.16: Resultados VSI para el 2 de mayo

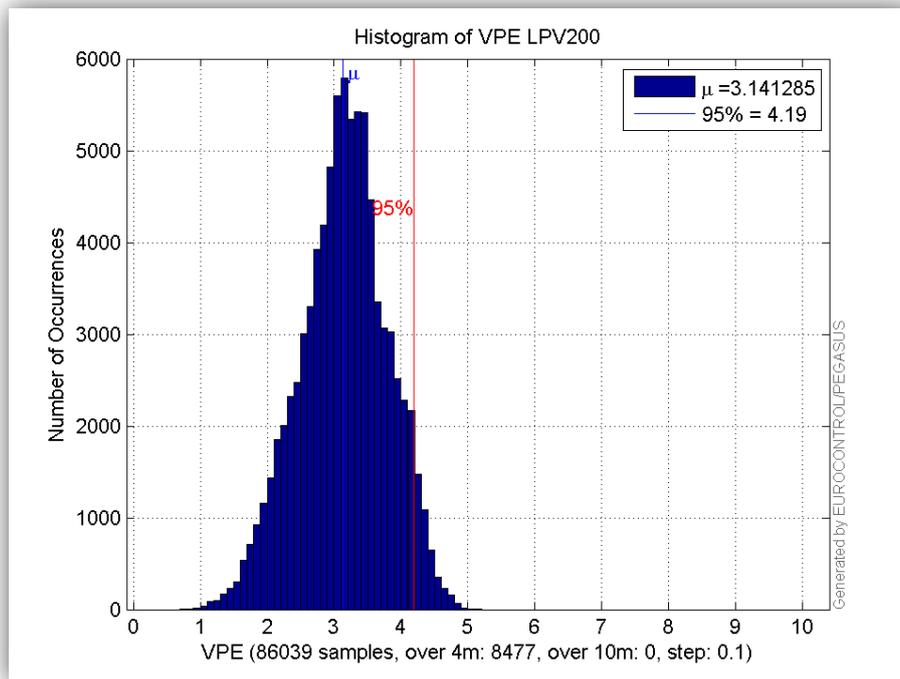


Figura 12.17: Resultados VPE para el 2 de mayo

- Día 3 de mayo de 2016

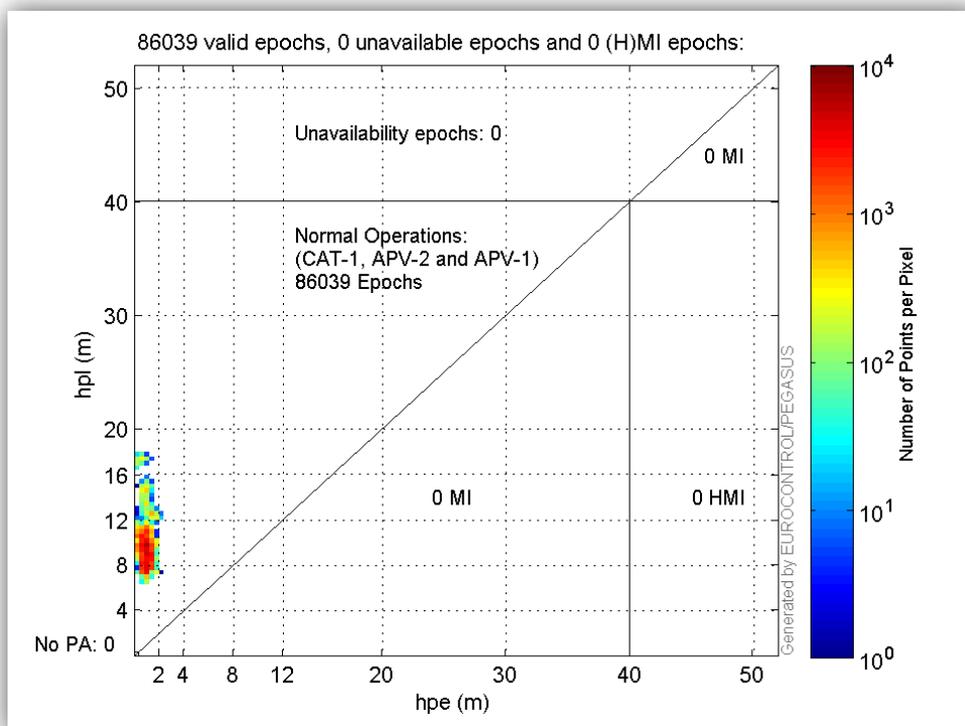


Figura 12.18: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 3 de mayo

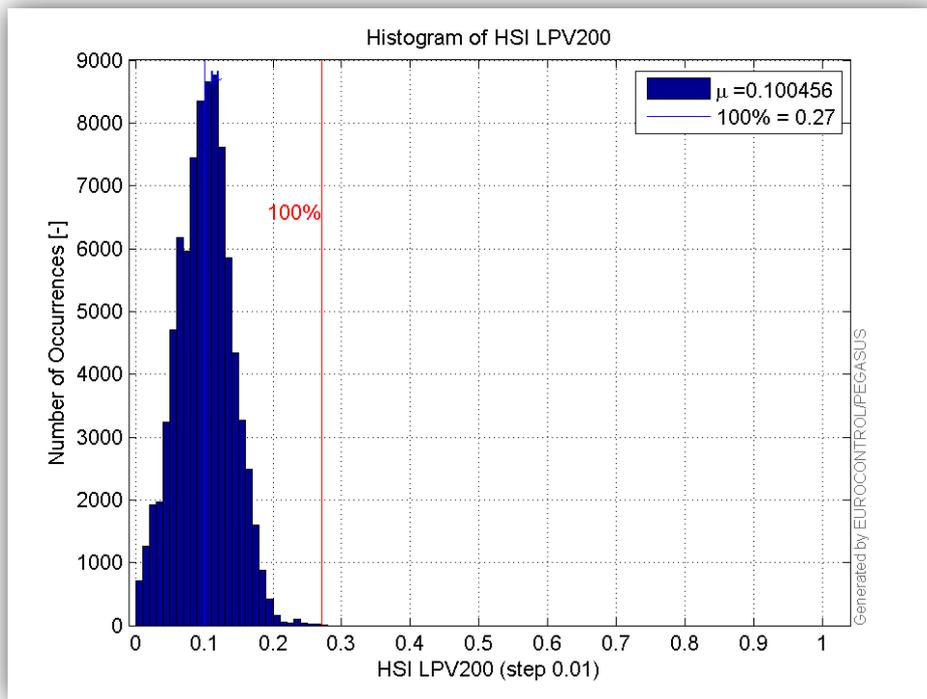


Figura 12.19 Resultados HSI para el 3 de mayo

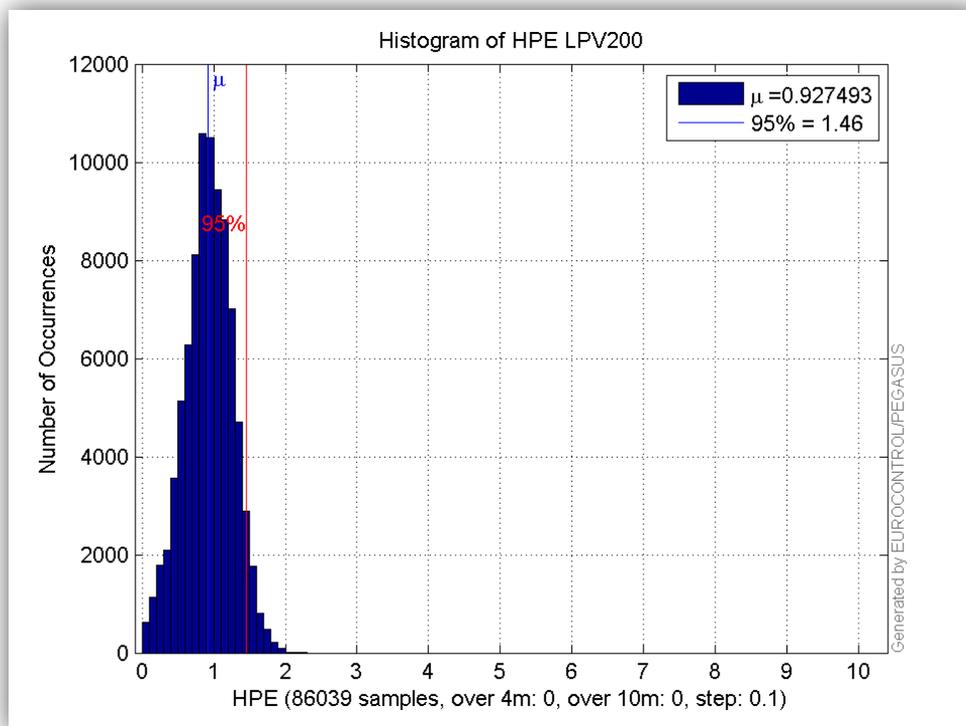


Figura 12.20: Resultados HPE para el 3 de mayo

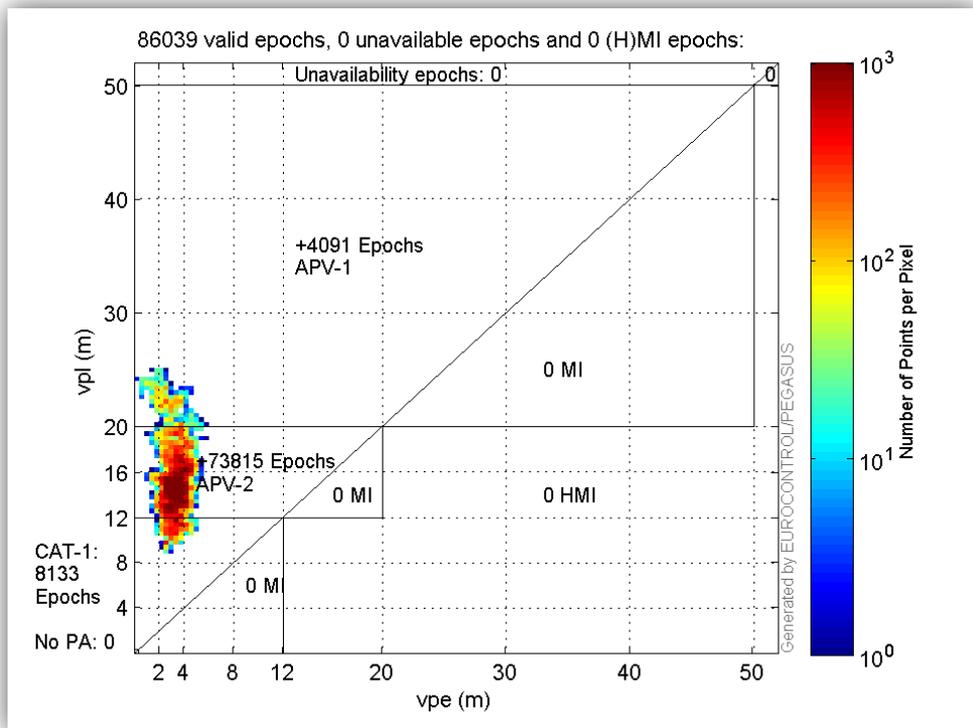


Figura 12.21: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 3 de mayo

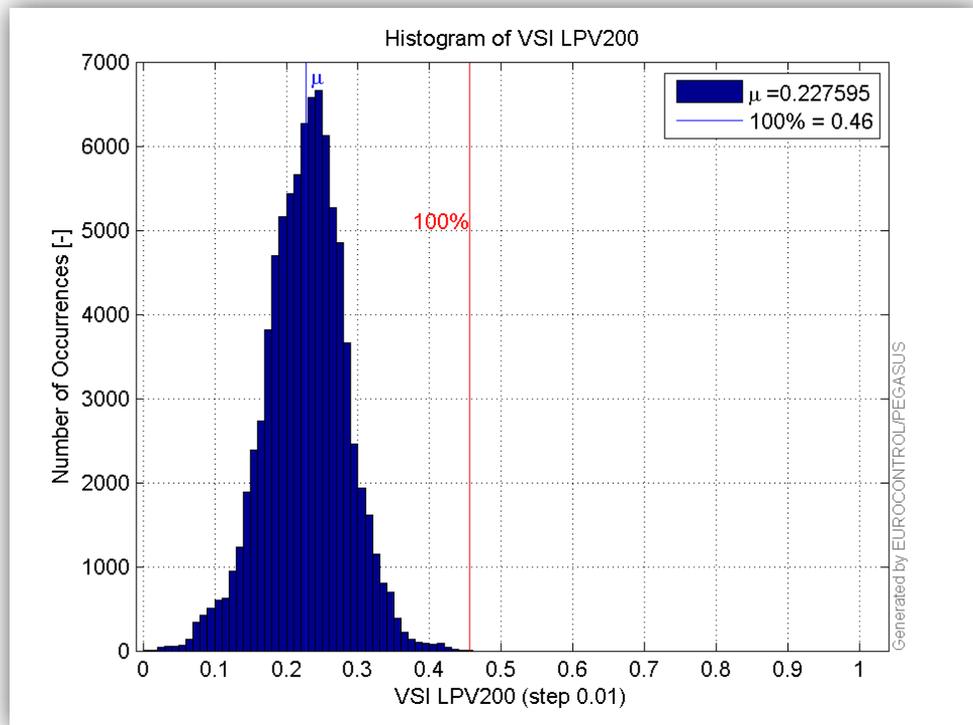


Figura 12.22: Resultados VSI para el 3 de mayo

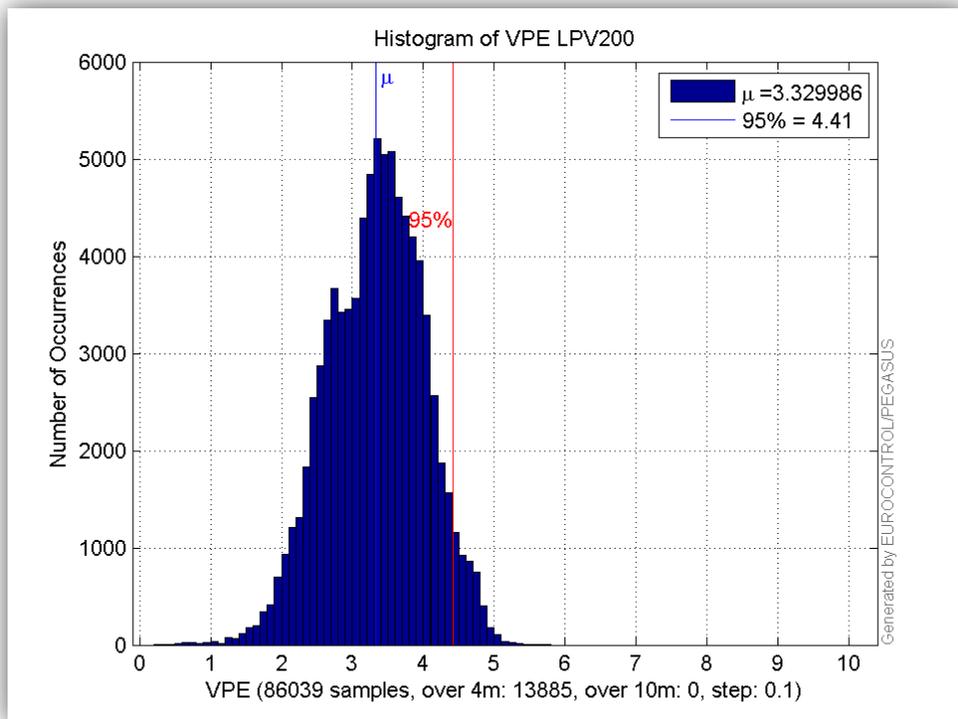


Figura 12.23: Resultados VPE para el 3 de mayo

- Día 4 de mayo de 2016

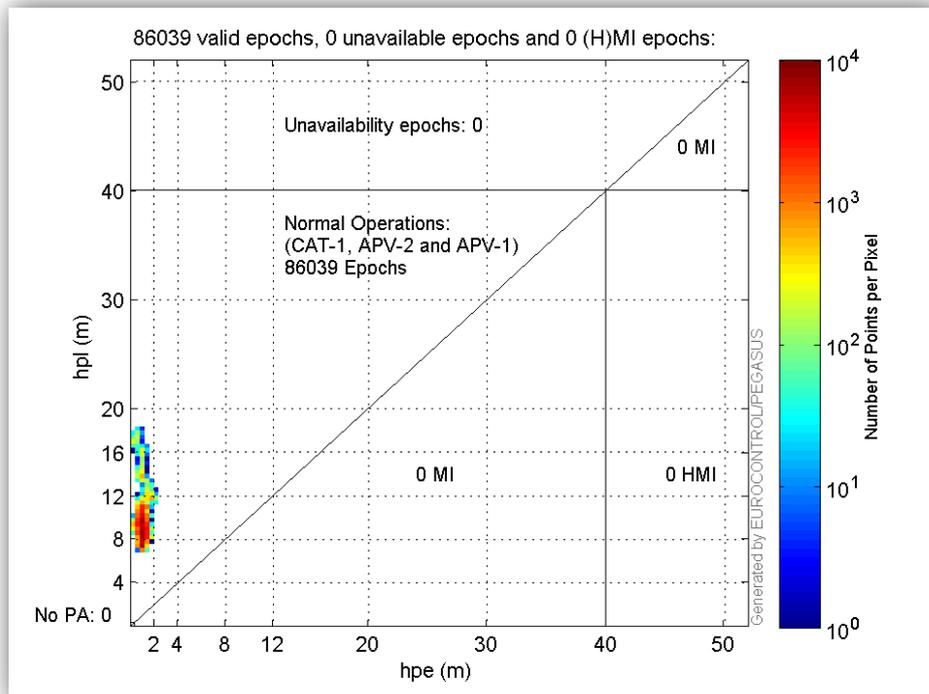


Figura 12.24: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 4 de mayo

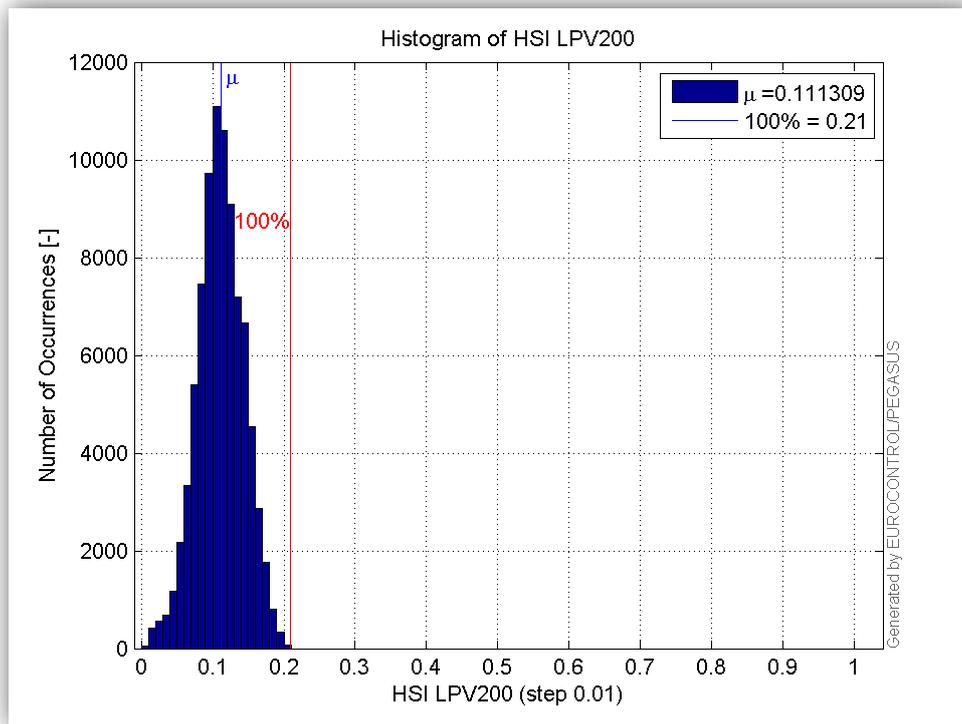


Figura 12.25 Resultados HSI para el 4 de mayo

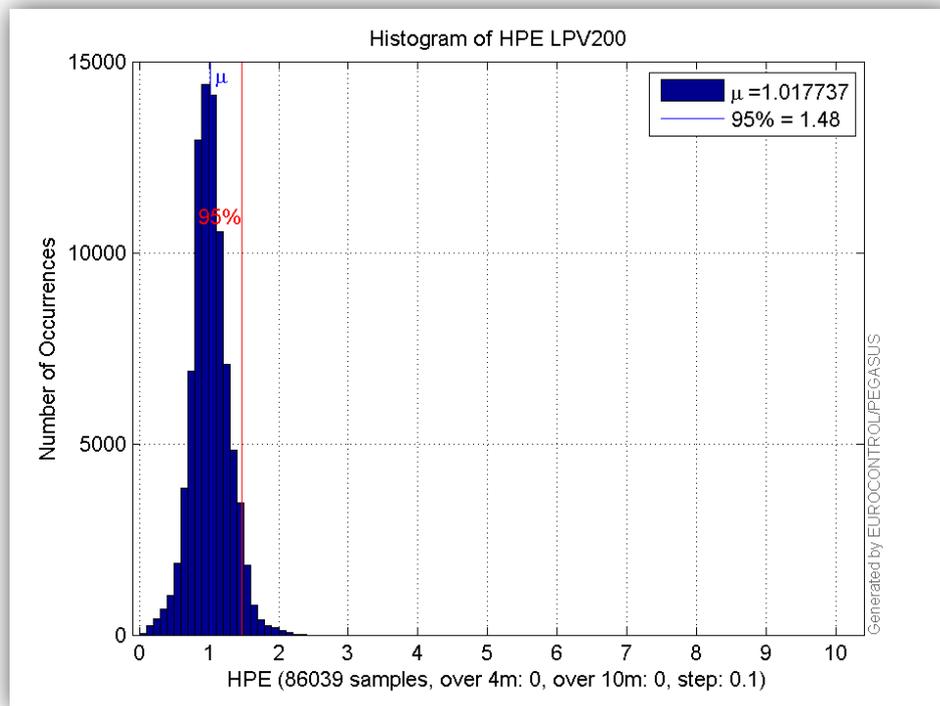


Figura 12.26: Resultados HPE para el 4 de mayo

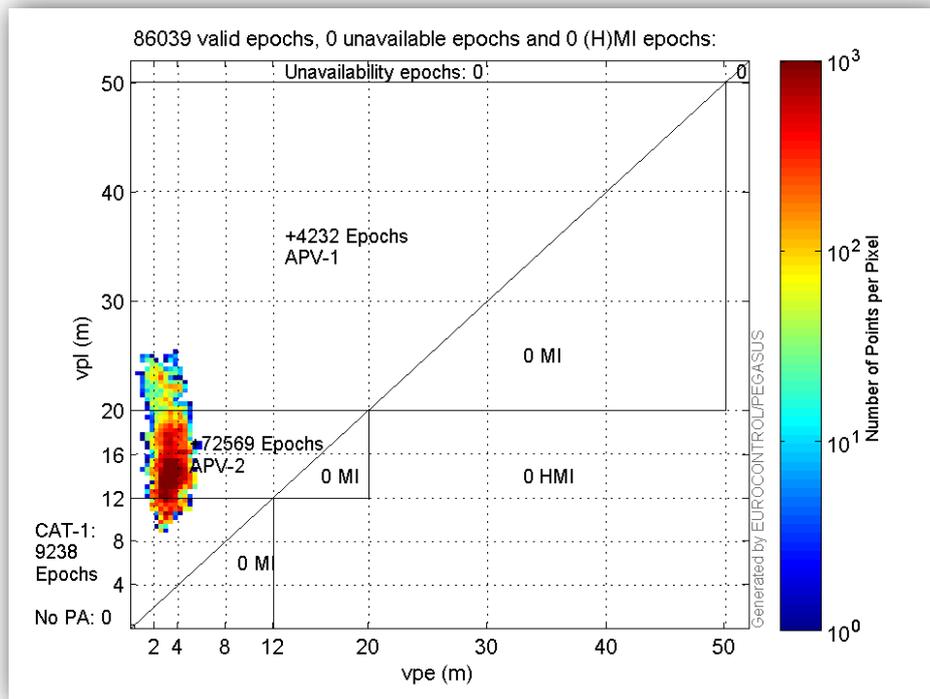


Figura 12.27: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 4 de mayo

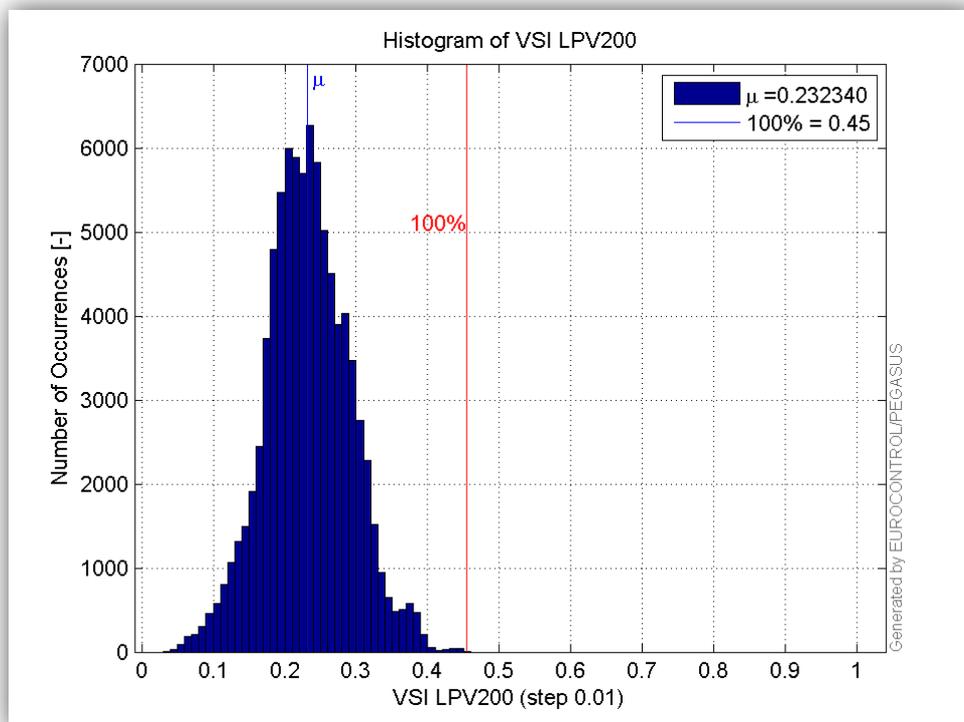


Figura 12.28: Resultados VSI para el 4 de mayo

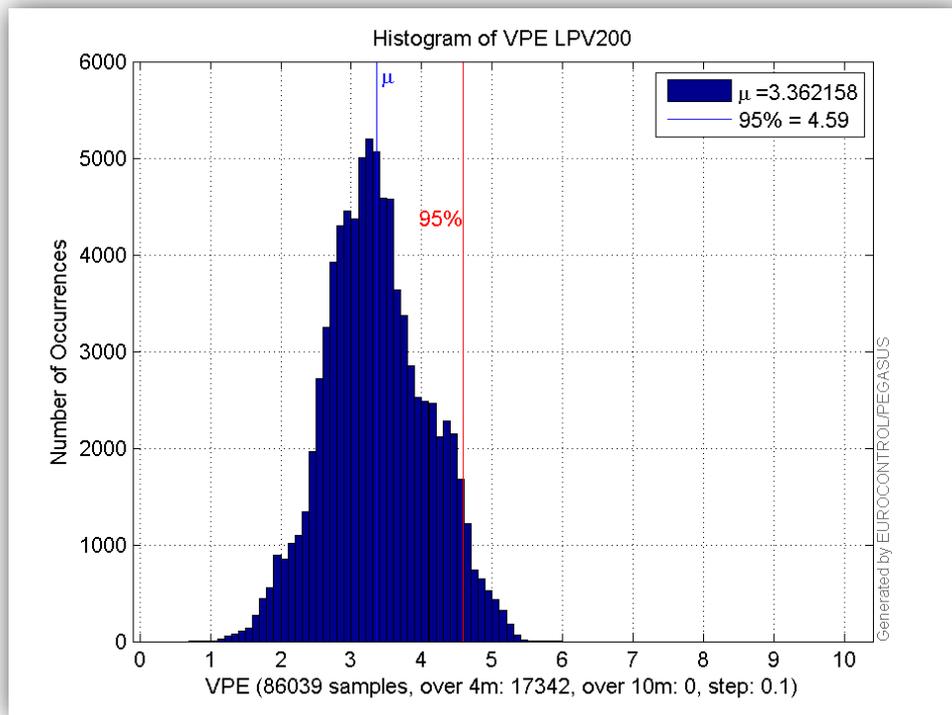


Figura 12.29: Resultados VPE para el 4 de mayo

- Día 5 de mayo de 2016

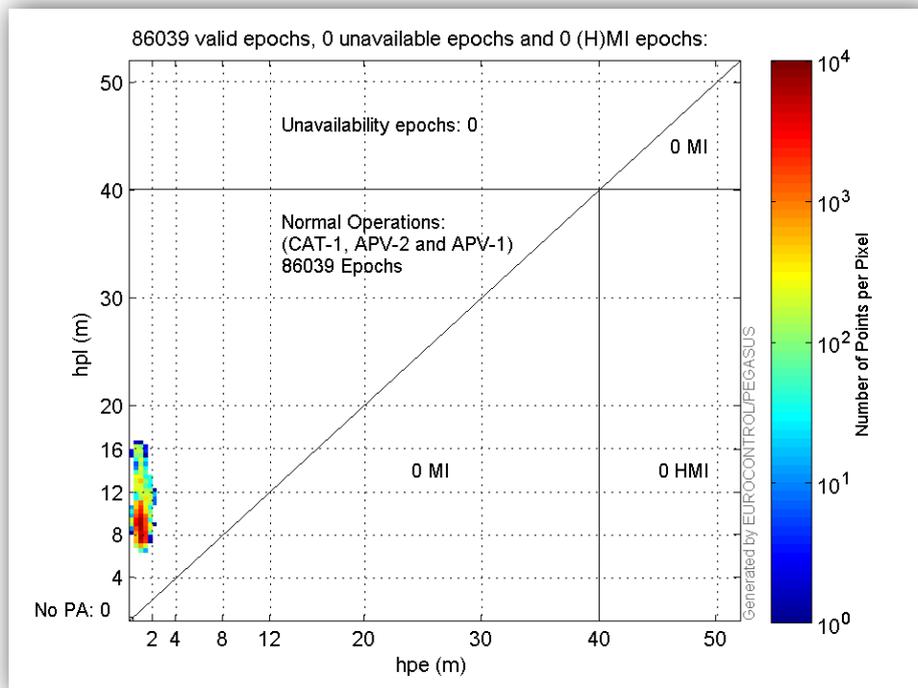


Figura 12.30: Diagrama de Stanford para la posición horizontal para el 5 de mayo

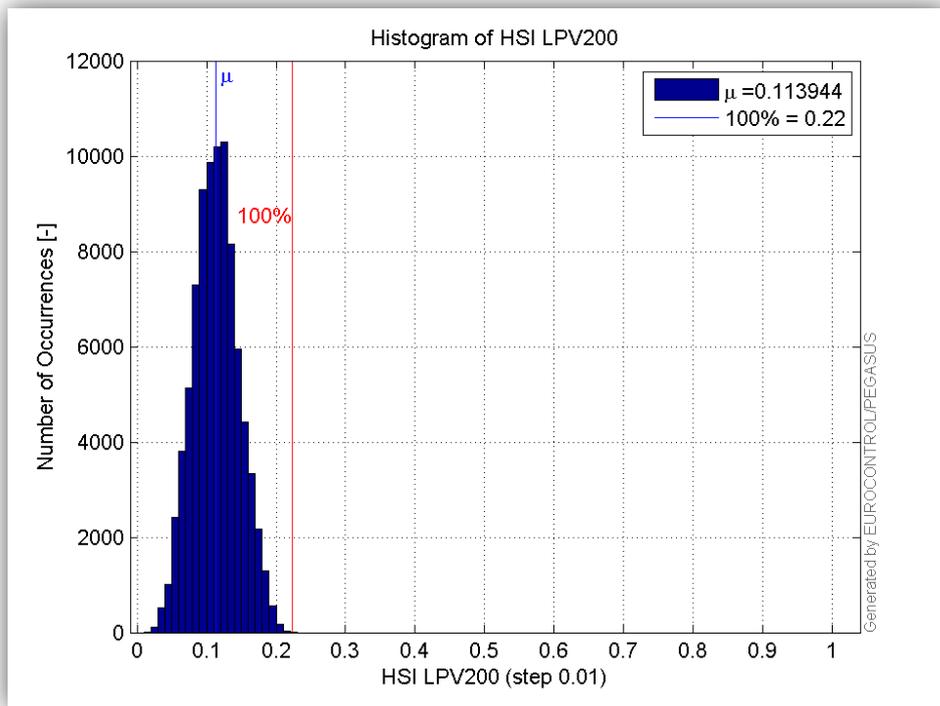


Figura 12.31 Resultados HSI para el 5 de mayo

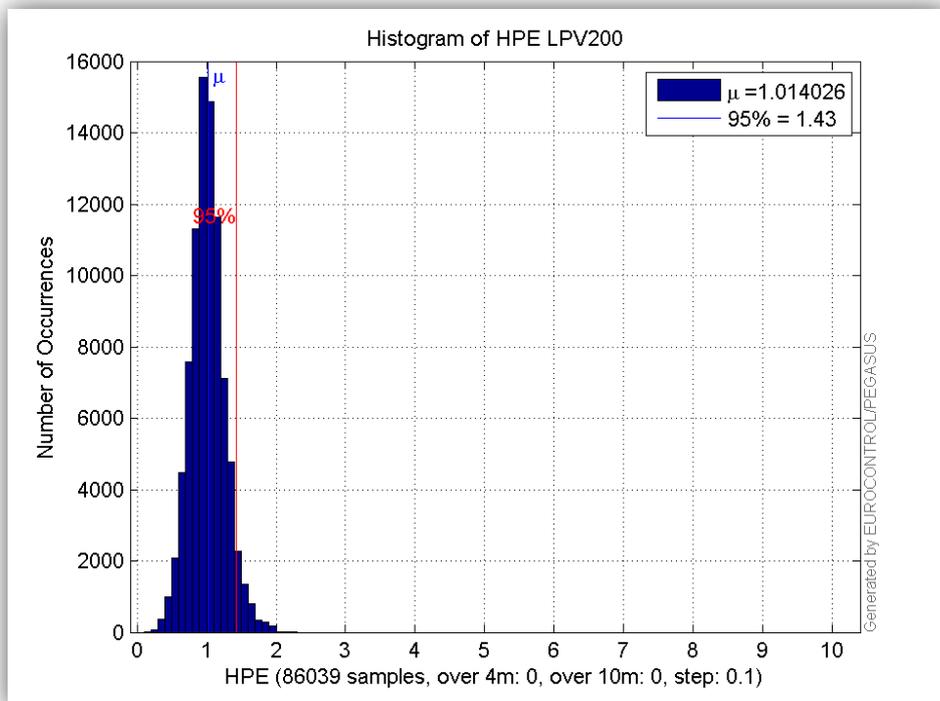


Figura 12.32: Resultados HPE para el 5 de mayo

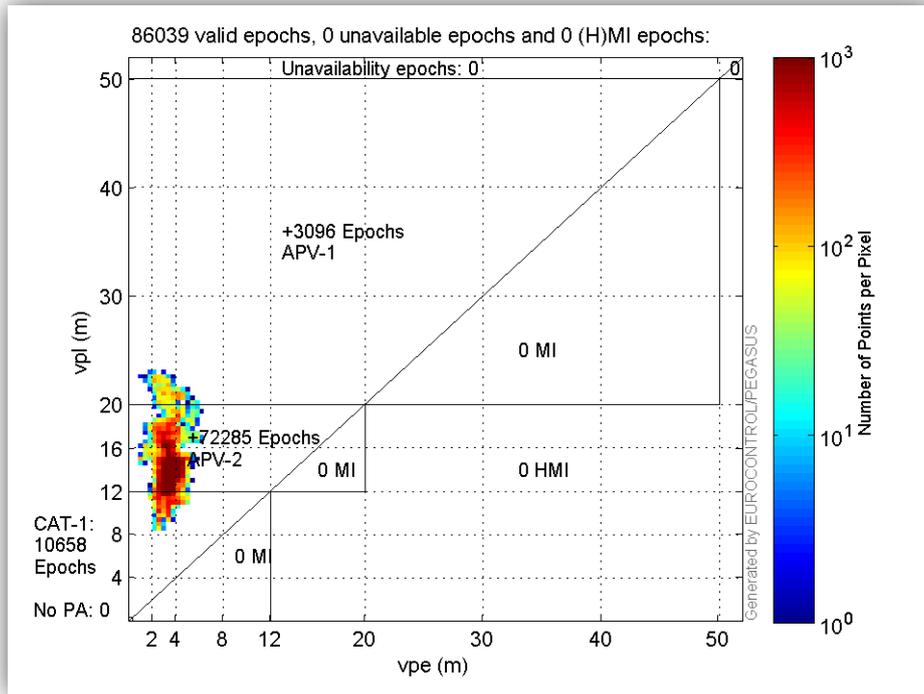


Figura 12.33: Diagrama de Stanford para la posición vertical para el 5 de mayo

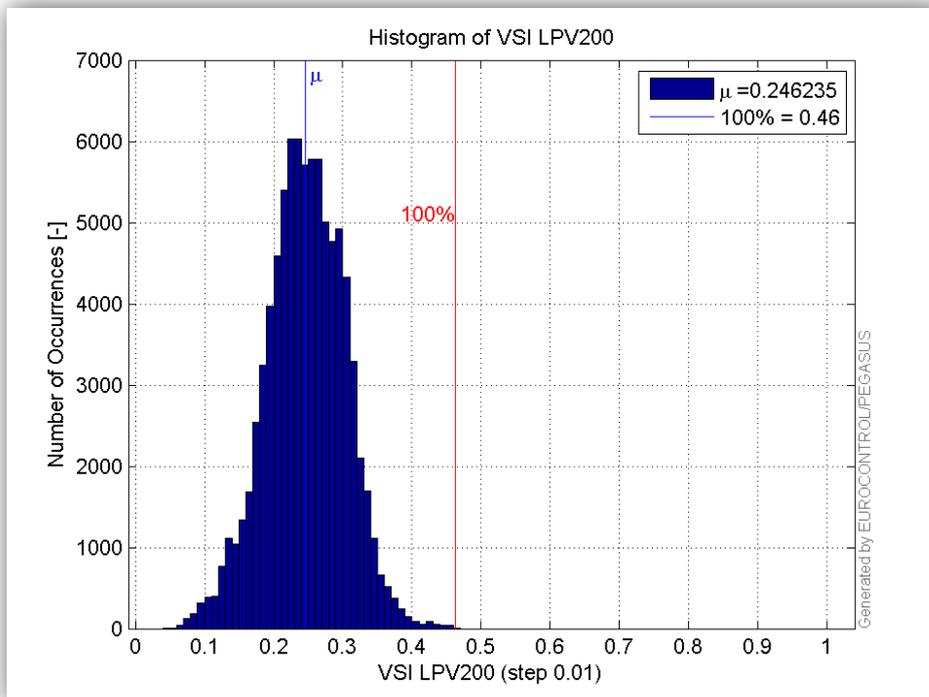


Figura 12.34: Resultados VSI para el 5 de mayo

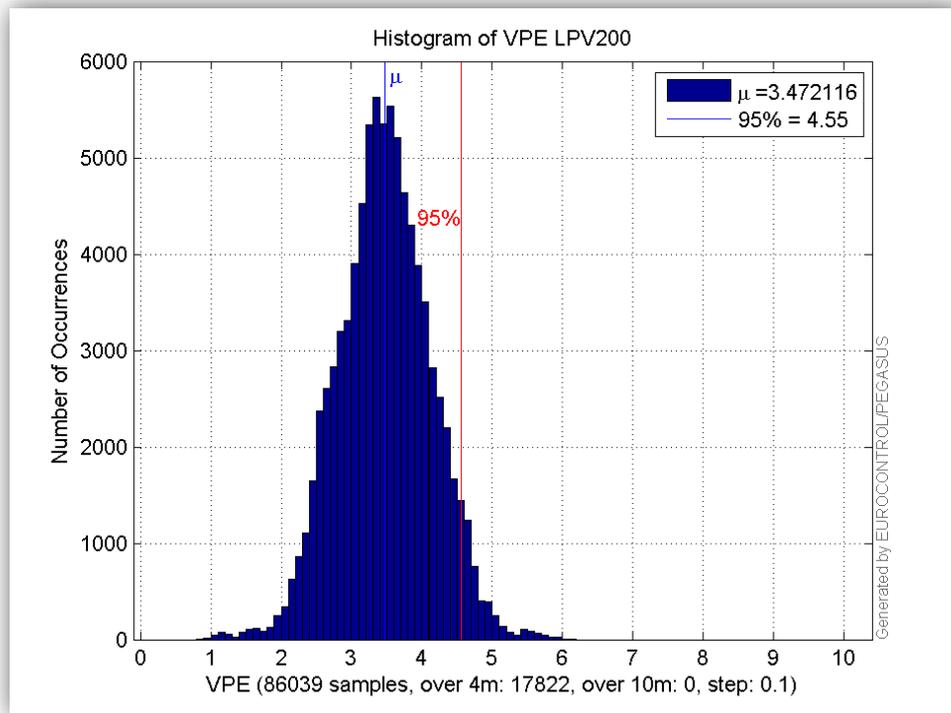


Figura 12.35: Resultados VPE para el 5 de mayo

Se puede concluir a partir de los resultados obtenidos con PEGASUS que, en lo que a integridad se refiere, el HSI y el VSI revelan que, en todo momento, los valores de dichos parámetros se encuentran por debajo de 1, cumpliendo así este requisito. De hecho, oscilan entre 0.2 y 0.5, valores bastante buenos. En cuanto a los diagramas de Stanford, al analizar el de la posición horizontal se observa que se encuentra dentro del área de operatividad y que no hay eventos de integridad. En cuanto al vertical, tampoco se observan eventos de integridad. Se puede afirmar que cumple los requisitos establecidos por la OACI para la integridad.

12.3. Continuidad

En este apartado, se procede a mostrar los resultados obtenidos mediante PEGASUS para la continuidad del sistema estudiado. Para ello, se agruparán en los 5 días de la fase mencionada, presentando cada uno de los días una única gráfica con la continuidad representada en forma de porcentaje.

- Día 1 de mayo de 2016

Discontinuity events :					
	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
All	--	--	--	310	--
Long	--	--	--	18	--
Independent	--	--	--	6	--
P(disc.)	NaN	NaN	NaN	0.0136488	NaN
P(slide)	NaN	NaN	NaN	0.128298	NaN

Figura 12.36: Resultados de continuidad para el 1 de mayo

- Día 2 de mayo de 2016

Discontinuity events :					
	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
All	--	--	--	396	--
Long	--	--	--	34	--
Independent	--	--	--	4	--
P(disc.)	NaN	NaN	NaN	0.00977676	NaN
P(slide)	NaN	NaN	NaN	0.178589	NaN

Figura 12.37: Resultados de continuidad para el 2 de mayo

- Día 3 de mayo de 2016

Discontinuity events :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
All	--	--	--	307	--
Long	--	--	--	17	--
Independent	--	--	--	4	--
P(disc.)	NaN	NaN	NaN	0.00737735	NaN
P(slide)	NaN	NaN	NaN	0.103283	NaN

Figura 12.38: Resultados de continuidad para el 3 de mayo

- Día 4 de mayo de 2016

Discontinuity events :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
All	--	--	--	467	--
Long	--	--	--	31	--
Independent	--	--	--	7	--
P(disc.)	NaN	NaN	NaN	0.0113661	NaN
P(slide)	NaN	NaN	NaN	0.12546	NaN

Figura 12.39: Resultados de continuidad para el 4 de mayo

- Día 5 de mayo de 2016

Discontinuity events :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
All	--	--	--	654	--
Long	--	--	--	42	--
Independent	--	--	--	13	--
P(disc.)	NaN	NaN	NaN	0.0182961	NaN
P(slide)	NaN	NaN	NaN	0.170764	NaN

Figura 12.40: Resultados de continuidad para el 5 de mayo

Como conclusión de este apartado y tras estudiar los resultados mostrados anteriormente, se puede afirmar que el sistema LPV-200 no presenta eventos de discontinuidad en su funcionamiento. No obstante no se puede afirmar, a partir de los resultados obtenidos, que el sistema presente los valores de continuidad requeridos para su operación. A pesar de ello, como ya se mencionó en el apartado 9, sería posible su uso para navegación aérea siempre que se mitigue dicho fallo en condiciones que lo permitan.

Se esperaban dichos resultados, ya que en los datos recogidos por EGNOS la continuidad tampoco cumplía los requerimientos especificados. Sin embargo, se acercan a dichos requerimientos, por lo que sería posible su uso.

12.4. Disponibilidad

Finalmente, se procede a analizar los resultados obtenidos con PEGASUS para la disponibilidad. Nuevamente, se agrupan las gráficas obtenidas por días. En este caso, se trata de dos gráficas por día, una con la disponibilidad de la señal SBAS y otra con la disponibilidad en función de la continuidad.

- Día 1 de mayo de 2016

Availability :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
Signal in Space	1	1	1	0.0770669	1
measurements	0.991644	0.991644	0.991644	0.0764229	0.991644
Operational	0.990301	0.990301	0.990301	0.0763194	0.990301

Figura 12.41: Disponibilidad para el 1 de mayo

- Día 2 de mayo de 2016

Availability :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
Signal in Space	1	1	1	0.0713281	1
measurements	0.995822	0.995822	0.995822	0.0710301	0.995822
Operational	0.995822	0.995822	0.995822	0.0710301	0.995822

Figura 12.42: Disponibilidad para el 2 de mayo

- Día 3 de mayo de 2016

Availability :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
Signal in Space	1	1	1	0.0945269	1
measurements	0.995822	0.995822	0.995822	0.0941319	0.995822
Operational	0.995822	0.995822	0.995822	0.0941319	0.995822

Figura 12.43: Disponibilidad para el 3 de mayo

- Día 4 de mayo de 2016

Availability :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
Signal in Space	1	1	1	0.10737	1
measurements	0.995822	0.995822	0.995822	0.106921	0.995822
Operational	0.995822	0.995822	0.995822	0.106921	0.995822

Figura 12.44: Disponibilidad para el 4 de mayo

- Día 5 de mayo de 2016

Availability :

	Valid	APV-1	LPV-200	CAT-1	APV-35m
Signal in Space	1	1	1	0.123874	1
measurements	0.995822	0.995822	0.995822	0.123356	0.995822
Operational	0.995822	0.995822	0.995822	0.123356	0.995822

Figura 12.45: Disponibilidad para el 5 de mayo

Finalmente, es posible concluir a partir de los resultados obtenidos en las tablas que, tanto la señal GPS como la disponibilidad operativa del sistema cumplen los mínimos requeridos (99-99.999 %).

13. Conclusiones

Aunque el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el de simular y analizar un procedimiento para la certificación del sistema LPV-200, ofrecido por EGNOS, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, ha sido necesario cubrir otros muchos puntos para su realización. Esto ha hecho de dicho trabajo un proyecto completo y más complejo de lo que resultó al principio. Además, ha sido necesario ceñirse a los resultados obtenidos, ya que serán empleados en una segunda parte desarrollada en un TFG complementario, que llevará a cabo la campaña sobre el terreno y el diseño de procedimientos. Este trabajo será el punto de partida de dicho proyecto.

Durante este TFG, se han introducido los diferentes sistemas GNSS presentes en la actualidad, se ha hablado de su arquitectura y características. También se han introducido los diferentes sistemas de aumentación, concentrándose la descripción de los mismos en los sistemas SBAS y explicando, brevemente, los asociados a cada sistema GNSS principal. Además, se ha explicado con mayor profundidad el sistema LPV-200 de EGNOS, hablando tanto de su implementación a nivel europeo y nacional, como de su funcionamiento, beneficios que ofrece y de su evolución futura prevista. Se han relacionado los conceptos de PBN y GNSS, viéndose la estrecha relación que guardan en cuanto a la especificación de estos últimos. El proyecto SESAR también se ha descrito brevemente, para comprender así la unificación del cielo europeo y lo que esto implica. Tras esta introducción de diversos conceptos teóricos que pretenden familiarizar al lector y alumno con GNSS, se han explicado los diferentes conceptos acerca de los requerimientos de navegación a cumplir, así como las etapas a seguir para ello.

En cuanto al software utilizado en la parte práctica del proyecto, los programas utilizados han sido variados y han constituido un gran número. Se ha trabajado con herramientas que permitían desde el acceso a la FTP de EDAS, pasando por la descompresión y concatenación de archivos, para finalizar con la simulación de la campaña sobre el terreno. El trabajo con dichas herramientas de software ha sido complicado, especialmente con PEGASUS.

La simulación final se realizó con PEGASUS, tal y como estaba previsto. No obstante, han aparecido numerosos problemas en la ejecución de los diferentes módulos que presenta el programa y los tutoriales de aprendizaje no funcionaron correctamente. Para solucionar los diferentes problemas que han aparecido a lo largo del tratamiento con PEGASUS, se recurrió a

contactos en EUROCONTROL y ENAIRE que, amablemente, atendieron nuestras dudas y las solucionaron con presteza y dedicación. Los manuales del programa encontrados en internet han sido también de gran ayuda para la solución de dichos problemas y la realización de la simulación final. El hardware empleado ha dificultado la simulación, ya que sus prestaciones alcanzaban con mínimos muy ajustados las requeridas por el software.

Los resultados obtenidos en las simulaciones han sido analizados y la conclusión de dicho análisis es que la fase de campaña sobre el terreno se ha superado correctamente, aunque los resultados pueden optimizarse. Esta fase de campaña sobre el terreno ha hecho uso de datos obtenidos a través de internet, para considerarse completa deberían tomarse datos en el lugar de emplazamiento del helipuerto. Como ya se ha mencionado, dicha tarea corre a cargo del TFG que tomará como punto de partida los últimos resultados obtenidos en este proyecto.

Finalmente, cabe remarcar la importancia y la cada vez mayor presencia que adquieren los procedimientos basados en GNSS con sistemas de aumentación en la Navegación Aérea. En un horizonte próximo, dichos procedimientos sustituirán, completamente, a las tradicionales radioayudas, mejorando el rendimiento de los aeropuertos y helipuertos, facilitando la reducción de costes y contaminación, tanto acústica como por emisiones, y contribuyendo a la seguridad de las operaciones, haciendo del transporte aéreo un medio, si cabe, más seguro.

II. PLIEGO DE CONDICIONES

14. Condiciones generales

14.1. General

En cualquier puesto de trabajo en el que, habitualmente y durante una parte relevante del trabajo se haga uso de un equipo con pantalla de visualización, ya bien se trate de un ordenador o vigilancia de pantallas, está sujeto a unos riesgos bien definidos que se deben prevenir. Este tipo de trabajo constituye, probablemente, el ejemplo más característico de cómo una nueva tecnología puede suponer la introducción de nuevos riesgos tales como problemas en ojos y visión, posturales y lesiones por movimientos repetidos y estrés.

Para mitigar dichos efectos, el Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización donde se aplican las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos laborales.

Las variables principales a las que se debe prestar especial atención para la prevención del tipo de riesgos a los que el trabajador puede enfrentarse en la realización del Trabajo de Fin de Grado son:

- Tiempo de permanencia requerida ante la pantalla, el cual puede ser de manera continua o discontinua.
- Tiempo de trabajo con la pantalla de visualización.
- Exigencia y grado de complejidad de la tarea que el operario tiene que realizar ante la pantalla de visualización.
- Necesidad de obtener información de manera rápida y precisa.

Los factores generales que se deben tener en cuenta para la prevención de riesgos laborales son:

- Seguridad (debido a contactos eléctricos, caída o golpes en el puesto de trabajo).
- Higiene industrial (iluminación, ruido y condiciones termo-higrométricas, transmisiones de virus en el ambiente de trabajo o bacterias nocivas a través del contacto en el teclado que podría acumular gran cantidad de estas).
- Ergonomía (fatiga visual, picores, percepción borrosa. Fatiga física y mental: ansiedad, irritabilidad o insomnio).

14.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril

Artículo 1. Objeto.

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.
2. Las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - a. Los puestos de conducción de vehículos o máquinas.
 - b. Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte.
 - c. Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - d. Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - e. Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - f. Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

1. Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
2. Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
3. Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo.

En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo.

2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:

- a. El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
 - b. El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
 - c. El grado de atención que exija dicha tarea.
3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.
 4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:
 - a. Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
 - b. Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
 - c. Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.
2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.
3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación.

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto,
2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto.

3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado 2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Anexo

Disposiciones mínimas

Por todo lo dispuesto anteriormente, se va a definir el puesto de trabajo específico para la prevención de riesgos laborales y seguridad.

1. Equipo.

a. Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b. Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones. La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad. El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno. La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario. Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla. La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c. Teclado.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos. La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos. La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización. Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d. Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio. El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y ojos. El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

e. Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable. La altura del mismo deberá ser regulable, el respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable. Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno

a. Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b. Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de

iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado. El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c. Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberían instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla. Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d. Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e. Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f. Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g. Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. Interconexión ordenador/persona.

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

- a. El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.
- b. El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.
- c. Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- d. Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.
- e. Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

15. Condiciones de especificaciones técnicas

15.1. Especificaciones de materiales y equipos

Hardware

El Hardware requerido para este proyecto debe ser capaz de soportar cómodamente los procesos, teniendo en cuenta que se realizarán simulaciones que ocuparán gran cantidad de tiempo. De entre los diferentes softwares empleados, PEGASUS es el que presenta unos requisitos de Hardware más concretos. De este modo, la computadora empleada deberá disponer, como mínimo, de un procesador Intel Pentium-n de al menos 350 MHz de velocidad, de 60 MB de disco duro disponible para la instalación, al menos 1 GB de disco duro disponible para el procesamiento de datos, con 5 GB recomendados, así como 128 Mb de memoria RAM disponibles, recomendándose 256 Mb para mejor funcionamiento. Se ha empleado un ordenador portátil de marca ASUS que cumple las especificaciones mencionadas anteriormente.

Software

El principal obstáculo del software utilizado, PEGASUS, es el total desconocimiento del mismo y la dificultad para acceder a determinados módulos, así como los problemas descritos en la memoria respecto a los escenarios proporcionados por EUROCONTROL. Tras contactar con ENAIRE y EUROCONTROL, junto con el estudio de los diferentes manuales de software encontrados en internet, se ha conseguido el correcto funcionamiento de PEGASUS y la generación de datos. El tratamiento de los ficheros RINEX también ha supuesto un trabajo tedioso y largo.

Los programas utilizados para la elaboración del proyecto:

- PEGASUS 4.8.4 y sus módulos Convertor, GNSS Solution y MFile Runner.
- Hatanaka
- TEQC
- PAG 1.3
- WinSCP
- PDF reader
- Microsoft Word

- Microsoft PowerPoint
- Microsoft Excel
- Línea de comandos CMD de la consola MS-DOS de windows
- Editor de textos
- SBAS Teacher
- SBAS Mentor
- SISNET User
- SISNET Lab
- Google Drive

Conexión a internet

La conexión a internet ha sido necesaria y elemental en la evolución del proyecto, aunque no se ha precisado en las simulaciones, conversiones o concatenaciones. Se ha precisado para la descarga de datos, desde los ficheros RINEX de las estaciones, pasando por los ficheros SBAS obtenidos de la FTP de EDAS, incluyendo la descarga del software del que no se disponía y finalizando con la búsqueda de manuales y demás documentos que han contribuido a la redacción del proyecto. La transferencia de archivos entre alumno y tutor ha requerido una conexión a internet rápida y sin interrupciones.

Conocimientos previos

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, se ha requerido de conocimientos previos en la rama de certificación y validación de procedimientos empleando GNSS, más concretamente en aquellos basados en SBAS. También eran necesarios conocimientos de Aeronavegación y en formato de transmisión de mensajes y archivos en el sector aeronáutico.

En el ámbito personal, son necesarias la autonomía, la perseverancia, predisposición y paciencia.

Conocimientos informáticos

En el ámbito de la simulación, es necesaria la familiarización con las herramientas que contribuirán a la consecución del proyecto y solución de problemas de forma rápida y eficiente. El desconocimiento de programas como PEGASUS, Hatanaka o TEQC ha supuesto una evolución más lenta del proyecto. Es recomendable un aprendizaje concurrente y un proceder multitarea para evitar caer en bloqueos o congestiones.

Material adicional

Es necesario acceder a documentos específicos del tema tratado, ya que la certificación y validación de procedimientos presenta unos requerimientos diferentes según el sistema a tratar. De este modo, dado que la mayoría de estos documentos no se encuentran traducidos al castellano, se recomienda el conocimiento del inglés para poder manejar la información.

Supervisión

El supervisor encargado del proyecto deberá tener experiencia demostrada y contrastada en la ejecución de proyectos relacionados con la certificación y validación de procedimientos GNSS, así como en el uso del software principal empleado para el mismo. Además, un porcentaje importante (al menos el 90%) de dichos proyectos deberán haber sido llevados a cabo de forma satisfactoria en lo referido a plazos, presupuesto, cumplimiento de las especificaciones y aceptación por parte del cliente.

III. PRESUPUESTO

16. Presupuesto

16.1. Introducción

El presente documento muestra los costes que ha supuesto la realización del Trabajo de Fin de Grado “ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA CERTIFICACIÓN Y DISEÑO DE UN SBAS (SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEM) PARA AEROPUERTOS/HELIÓDROMOS”. En este capítulo se presentan los gastos de material, software, personal y de oficina. Más concretamente, en este proyecto no han sido necesarios materiales adicionales, sino tan sólo software y personal que lo haga funcionar. Forman parte de los presupuestos parciales que, en conjunto, constituyen el presupuesto total del proyecto. Los precios aplicados a los grupos de coste corresponden a tarifas legales vigentes, habiéndose realizado, en caso de necesidad, estimaciones coherentes. Debido a que el trabajo realizado en el presente proyecto está destinado a investigaciones internas del Departamento De Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría, en este precio no se incluye el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA). Si los resultados obtenidos fueran para un trabajo encomendado por alguna empresa externa al Departamento, sí que se hubieran añadido gastos generales, el beneficio económico y el IVA.

El coste de amortización se calcula como:

$$a = \frac{VC - VR}{n}$$

$$t_h = \frac{a}{h}$$

donde:

a: amortización en euros/año.

VC: valor de compra, en euros.

VR: valor residual al cabo del periodo de amortización, en euros.

n: periodo de amortización en años.

t_h: tasa horaria, en euros/hora.

h: horas trabajadas al año.

Los precios unitarios correspondientes al personal se calculan como:

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = \left(\frac{\text{sem}}{\text{año}} - \frac{\text{sem}_{\text{vacaciones}}}{\text{año}} - \frac{\text{sem}_{\text{festivos}}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{sem}}$$

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = (52 - 6) \cdot 40 = 1840 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{\frac{\text{Salario bruto anual}}{\text{Horas trabajadas}}}{\text{año}}$$

16.2. Estado de mediciones

Se definen en este apartado los recursos necesitados para la correcta realización del presente Trabajo de Fin de Grado:

- Conjunto de equipos informáticos y Software

Descripción	Unidades
Ordenador portátil Asus	1
Licencia Microsoft Office 2010	1
Licencia PEGASUS 4.8.4	1
Licencia Hatanaka	1
Licencia TEQC	1
Licencia WinSCP	1

- Montaje e instalación del equipo informático

Descripción	Unidades
Ordenador portátil Asus	1

- Instalación del software específico

Descripción	Unidades
PEGASUS 4.8.4	1
Hatanaka	1
TEQC	1
WinSCP	1
Microsoft Office 2010	1

- Personal específico para el desarrollo del proyecto

Descripción	Unidades
Profesor titular	1
Ingeniero Superior	1

- Oficina para la ubicación de los elementos y desarrollo del proyecto

Descripción	Unidades
Oficina	1
Permisos de oficina	1
Seguro de oficina	1

16.3. Desglose de costes unitarios

16.3.1. Coste de material y software unitario

- Equipo informático
 - Portátil. Se ha estimado el valor residual del 20% y un periodo de amortización de 5 años.

$$a = \frac{500 - 100}{5} = 80$$

$$t_h = \frac{80}{1840} = 0.043 \frac{\text{euros}}{\text{hora}}$$

- Software. Se tiene en cuenta el coste anual de los software y se consideran amortizados en ese año de licencia y sin valor residual:

- Licencia PEGASUS 4.8.4. El valor anual para trabajar con dicho software es nulo, es decir, se trata de un programa libre del que se puede disponer sin necesidad de adquirir una licencia mediante pago.

$$a = 0$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

- Licencia Hatanaka. Sucede lo mismo que con PEGASUS 4.8.4.

$$a = 0$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

- Licencia TEQC. De nuevo, se trata del mismo caso que los dos anteriores.

$$a = 0$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

- Licencia WinSCP. Finalmente, se repite la misma situación que con el resto de software mostrado hasta ahora.

$$a = 0$$

$$t_h = 0 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

- Licencia Microsoft Office 2010. El valor de una licencia anual estándar es de 49 euros.

$$a = \frac{49}{1} = 49$$

$$t_h = \frac{49}{1610} = 0.027 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

16.3.2. Coste de personal cualificado unitario

- Coste asociado al Profesor Titular.

$$\text{Salario bruto anual} = 35000 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{35000}{1840} = 19.02 \frac{\text{euros}}{\text{hora}}$$

- Coste asociado al Ingeniero Superior.

$$\text{Salario bruto anual} = 22000 \frac{\text{euros}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{22000}{1840} = 11.96 \frac{\text{euros}}{\text{hora}}$$

16.3.3. Coste de oficina unitario

El lugar en el que se ha desarrollado el proyecto está ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, en la Universidad Politécnica de Valencia. El coste de alquiler de la oficina, en este caso un Seminario de Geodesia, se ha estimado en base a la media de alquiler de oficinas en la ciudad de Valencia con un valor de 900 euros. Además, el coste se divide entre 4 personas que la ocupan:

$$\text{Coste mensual oficina} = \frac{900}{4} = 225 \frac{\text{euros}}{\text{mes}}$$

$$\text{Coste total} = 225 \frac{\text{euros}}{\text{mes}} \cdot 3 \text{ meses} = 675 \text{ euros}$$

Los costes incluyen los permisos, gastos de luz, agua y calefacción, material de oficina y el seguro correspondiente.

16.4. Desglose de costes totales

16.4.1. Coste de material y software total

Descripción	Horas	Importe (euros)
Ordenador portátil	300	13.04
Licencia PEGASUS 4.8.4	300	0
Licencia Hatanaka	300	0
Licencia TEQC	300	0
Licencia WinSCP	300	0
Licencia Microsoft Office 2010	300	8
Total	-	21.04

16.4.2. Coste de personal cualificado total

Descripción	Horas	Importe (euros)
Profesor Titular	156	2967.40
Ingeniero Superior	50	597.83
Total	-	3565.23

16.4.3. Coste de oficina total

Descripción	Horas	Importe (euros)
Alquiler de oficina	3	675
Total	-	675

16.5. Resumen del presupuesto total

Cantidad	Subtotal (euros)
Coste de material y software	21.04
Coste de personal cualificado	3565.23
Coste de oficina	675
Coste total proyecto	4261.27

El presupuesto total del presente proyecto asciende a CUATRO MIL DOSCIENTOS SESENTA Y UN EUROS.

17. Bibliografía

- [1] OACI DOC 8168. Operación de aeronaves. Vol. II – Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos. Quinta edición.
- [2] OACI DOC 9613. Performance-based navigation manual. Tercera edición.
- [3] OACI DOC 9849. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. Primera edición.
- [4] OACI DOC 9905. Manual de diseño de procedimientos de performance de navegación requerida con autorización obligatoria (RNP AR). Primera edición.
- [5] OACI DOC 9906. Manual de garantía de calidad para el diseño de procedimientos de vuelo. Primera edición.
- [6] OACI Anexo 6. Operaciones de aeronaves. Parte I. Transporte aéreo comercial internacional – Aeroplanos. Novena edición.
- [7] OACI Anexo 10. Telecomunicaciones aeronáuticas. Vol II. Procedimientos de comunicaciones incluso los que tienen categoría de PANS. Sexta edición.
- [8] OACI Anexo 14. Aeródromos. Vol I. Diseño y operaciones de aeródromos. Cuarta edición.
- [9] European Commission. EGNOS Data Access Service (EDAS) Service Definition Document. December 2014.
- [10] European Commission. EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document. September 2015.
- [11] European Commission. EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document. December 2014.
- [12] European Commission. EGNOS fact sheet. Integrity Explained.
- [13] Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. Cuarta edición.
- [14] AMC 20-26. Anexo II. Airworthiness Approval and Operational Criteria for RNP Authorisation Required (RNP AR) Operations.

- [15] AMC 20-27. Anexo III. Airworthiness Approval and Operational Criteria for RNP APPROACH (RNP APCH) Operations Including APV BARO-VNAV Operations.
- [16] AMC 20-28. Anexo II. Airworthiness Approval and Operational Criteria related to Area Navigation for Global Navigation Satellite System approach operation to Localizer Performance with Vertical guidance minima using Satellite Based Augmentation System.
- [17] European Commission. EGNOS Bulletin. Q1-Q4 2015.
- [18] European Commission. EGNOS Bulletin Q1 2016.
- [19] Global Navigation Satellite Systems. Signal, Theory and Applications. Edited by Shuanggen Jin. Published by InTech. 2012.
- [20] European Commission. EGNOS how to obtain RNP APCH operational approval to LPV minima in Europe. October 2015.
- [21] European Commission. EGNOS Workshop 2014.
- [22] European Commission. EGNOS Workshop 2015.
- [23] GNSS linked to PBN. Anne-Laure Vogel – Egis Avia. Rabat, 18-01-2011.
- [24] SESAR. European ATM Master Plan. The Roadmap for sustainable air traffic management. Segunda edición. October 2012.
- [25] Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration. Interface Specification IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. March 2014.
- [26] European Commission. EGNOS. Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation.
- [27] GNSS Performance Based Navigation Procedures Validation. Aena & GMV.
- [28] UNAVCO. TEQC tutorial. Basics of Teqc Use and Teqc Products. June 2014.
- [29] EUROCONTROL. PEGASUS. GBAS Tutorial. September 2012.
- [30] EUROCONTROL. PEGASUS. Software User Manual. January 2004.
- [31] EUROCONTROL. PEGASUS. Software User Manual. Convertor. January 2004.
- [32] EUROCONTROL. PEGASUS. Software User Manual. MFile Runner. January 2004.

- [33] EUROCONTROL. PEGASUS. Software User Manual. WinGPSAll. Januari 2004.
- [34] Apuntes Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía (NACC). Phd Israel Quintanilla. Curso 2014-2015.
- [35] Real Decreto 488/1997 de 14 de abril sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización. <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-8671>
- [36] <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1237551223699/>
- [37] <http://www.navipedia.net/index.php/NAVIC>
- [38] <http://www.navipedia.net/index.php/QZSS>
- [39] <http://www.navipedia.net/index.php/Galileo>
- [40] <http://www.navipedia.net/index.php/GPS>
- [41] http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_General_Introduction
- [42] http://www.navipedia.net/index.php/BeiDou_General_Introduction
- [43] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/
- [44] http://www.navipedia.net/index.php/WAAS_General_Introduction
- [45] http://www.navipedia.net/index.php/MSAS_Space_Segment
- [46] <http://www.navipedia.net/index.php/GAGAN>
- [47] http://www.navipedia.net/index.php/Interfaces_and_Protocols
- [48] <https://www.essp-sas.eu/>
- [49] TFG: Simulación, Proceso y Análisis para la Certificación del Sistema de Navegación Aérea por Satélite EGNOS en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID-UPV). Cayetano Marco Ortuño. Julio de 2015.
- [50] TFG: Análisis y Estudio de la Modelización e Implantación de un Sistema GBAS. Aplicación a un Aeropuerto Español. Belén Chuliá Latorre. Julio de 2015.